

# Fusionando bencenos a demanda: integrando química orgánica y síntesis sobre superficie

## Fusing benzenes on demand: integrating organic chemistry and on-surface synthesis

Iago Pozo, Dolores Pérez y Diego Peña\*

*Centro Singular de Investigación en Química Biolóxica e Materiais Moleculares (CiQUS)  
y Departamento de Química Orgánica, Universidade de Santiago de Compostela.*

### PALABRAS CLAVE:

Ciencia sobre superficie  
Microscopías avanzadas  
Nanografenos  
Manipulación atómica  
Reactividad sobre superficies

### RESUMEN:

La integración de la química orgánica con la ciencia de superficies ha permitido avanzar en la síntesis de nanografenos mediante la fusión controlada de anillos bencénicos. Además, las mejoras en las microscopías por sonda de barrido han permitido caracterizar estas nanoestructuras con resolución submolecular. Aunque el desarrollo de la síntesis sobre superficie es relativamente reciente, se han identificado algunas transformaciones que permiten acceder a estructuras fascinantes. La mayoría de las metodologías actuales emplean reacciones inducidas térmicamente y promovidas por superficies metálicas. Sin embargo, también se han introducido estrategias que permiten llevar a cabo reacciones sobre superficies aislantes, por ejemplo, mediante la aplicación de pulsos de voltaje desde la punta del microscopio. Este artículo recoge algunos ejemplos destacados en este campo científico emergente en la interfase entre disciplinas.

### KEYWORDS:

On-surface science  
Advanced microscopies  
Nanographenes  
Atomic manipulation  
Reactivity on surfaces

### ABSTRACT:

The integration of organic chemistry with surface science has enabled advances in the synthesis of nanographenes through the controlled fusion of benzenoid rings. Moreover, improvements in scanning probe microscopies have allowed the characterization of these nanostructures with submolecular resolution. Although on surface synthesis is still relatively recent, several transformations have been identified that provide access to fascinating structures. Most current methodologies employ thermally induced reactions promoted by metallic surfaces. However, existing strategies enable reactions on insulating surfaces, for example, through the application of voltage pulses from the microscope tip. This article highlights selected examples in this emerging scientific field at the interface between disciplines.

En 2009, el grupo de Leo Gross en IBM Zurich logró por primera vez visualizar moléculas individuales de pentaceno con resolución submolecular.<sup>[1]</sup> Este hito fue posible gracias al desarrollo de técnicas avanzadas como la microscopía de fuerza atómica (AFM) y la microscopía de efecto túnel (STM), operando en condiciones de ultra alto vacío, temperaturas criogénicas (< 10 K) y puntas funcionalizadas con una única molécula de monóxido de carbono (CO). En estas condiciones es posible discriminar los órdenes de enlace en moléculas individuales<sup>[2]</sup> o los cambios estructurales en función del estado de oxidación de la molécula depositada sobre NaCl.<sup>[3]</sup> Además, estos microscopios de sonda de barrido no solo posibilitan la visualización de moléculas individuales, sino que también permiten estudiar sus propiedades electrónicas, por ejemplo, mediante espectroscopia de efecto túnel (STS).<sup>[4]</sup>

Paralelamente a la evolución de estas microscopías de sonda de barrido, el avance en las transformaciones químicas sobre superficie ha permitido acceder a un gran número de nanoestructuras de carbono con propiedades relevantes. Mientras que algunas de estas transformaciones se han conseguido

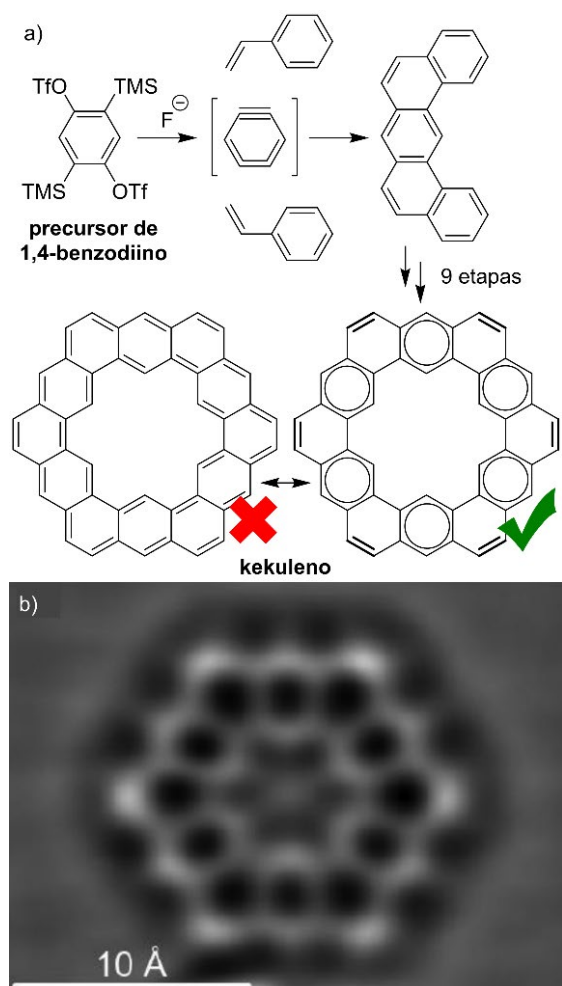
mediante la aplicación de pulsos eléctricos desde la punta del microscopio,<sup>[5,6]</sup> lo que permite realizar reacciones unimoleculares, en otros procesos se aprovecha la reactividad de la superficie metálica como catalizador,<sup>[7,8]</sup> abriendo el camino para la síntesis de materiales poliméricos.<sup>[9,10]</sup>

Los nanografenos, nanoestructuras de carbono resultado de fusionar anillos bencénicos de forma definida, son una de las familias moleculares más investigadas en el campo de la ciencia sobre superficie. La mayoría de los nanografenos presentan una estructura plana, por lo que su solubilidad es muy baja, obstaculizando en muchos casos su caracterización y el estudio de sus propiedades. Sin embargo, esta geometría plana es una ventaja para su estudio sobre superficie, ya que permite obtener imágenes de gran calidad mediante AFM y STM. Un ejemplo significativo es el del kekuleno, un nanografeno icónico cuya síntesis, originalmente descrita por Diederich y Staab,<sup>[11]</sup> fue optimizada en 2019 mediante química de arinos.<sup>[12]</sup> Esta nueva aproximación sintética utiliza una doble reacción de Diels-Alder entre dos moléculas de estireno y el 1,4-benzodiino (Figura 1a). La caracterización del kekuleno sobre una

**CÓMO CITAR:** I. Pozo, D. Pérez, D. Peña. *An. Quím. RSEQ* 2025, 121, 308-313, https://doi.org/10.62534/rseq.aq.2098

\* C-e: diego.pena@usc.es

superficie de cobre mediante AFM proporcionó imágenes de moléculas individuales con una calidad suficiente como para poder determinar su estructura electrónica, caracterizada por la presencia de seis sextetes aromáticos conectados por dobles enlaces localizados en los vértices de la estructura hexagonal (Figura 1b).<sup>[12]</sup> La combinación de AFM/STM se ha utilizado también para caracterizar otros nanografenos, como uno con forma de trébol formado por la fusión de 22 anillos bencénicos<sup>[13]</sup> u otro de estructura dendrítica formado por 19 anillos *cata*-fusionados.<sup>[14]</sup>



**Figura 1.** a) Síntesis y b) imagen de AFM del kekuleno. Reproducida de Ref. [12]. Copyright (2019, ACS AuthorChoice) con permiso de la ACS.

La síntesis de los nanografenos mencionados anteriormente se llevó a cabo en disolución, y únicamente su caracterización estructural tuvo lugar sobre superficie. Sin embargo, debido a su insolubilidad, los nanografenos preparados de esta forma suelen encontrarse mezclados con subproductos, también insolubles, que dificultan su estudio. Una alternativa consiste en el diseño de precursores de nanografeno solubles, fácilmente purificables mediante técnicas cromatográficas, lo que garantiza una elevada pureza y una manipulación sencilla. A continuación, estos precursores pueden transformarse sobre superficie para dar lugar a los nanografenos objetivo. El descubrimiento de nuevas transformaciones químicas sobre superficie ha abierto un amplio abanico de posibilidades sintéticas.<sup>[15]</sup> A continuación, se recogen algunas de las reacciones

químicas más empleadas para la síntesis de hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPAs) y nanografenos sobre superficie.

### Síntesis de nanografenos sobre superficie

La química sintética sobre superficie ha experimentado un notable crecimiento en los últimos años. Posiblemente, las reacciones de ciclodeshidrogenación y los acoplamientos tipo Ullmann son las reacciones más empleadas para la obtención de estructuras gráficas. Los avances en el campo son continuos y el arsenal de métodos sintéticos ha aumentado especialmente en los últimos años.

#### Ciclodeshidrogenación

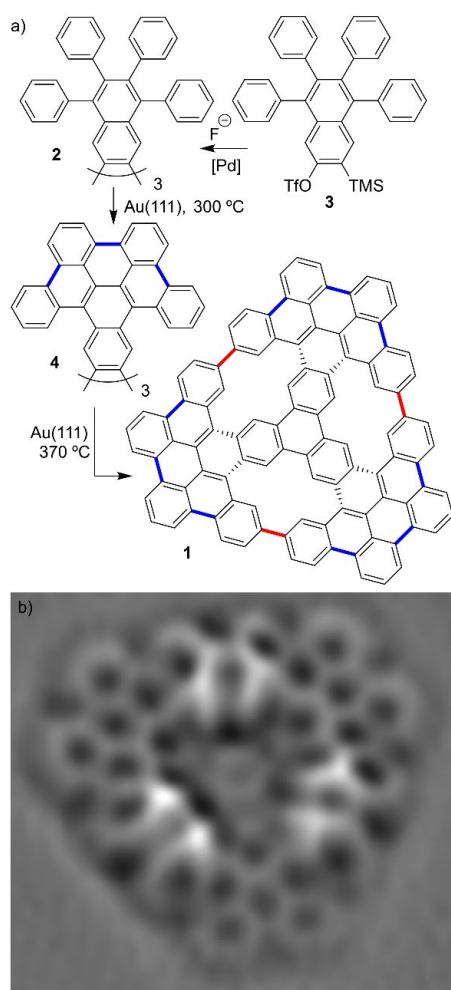
Tradicionalmente, la reacción de Scholl ha sido ampliamente empleada para la síntesis de nanografenos en disolución, ya que facilita el acoplamiento intramolecular entre carbonos bencénicos.<sup>[16]</sup> La versión de esta reacción sobre superficie resulta sorprendentemente sencilla: el tratamiento térmico bajo condiciones de UHV de un precursor de nanografeno depositado sobre una superficie metálica es suficiente para inducir una cascada de ciclodeshidrogenaciones, especialmente si el producto final es plano.

Uno de los primeros trabajos en esta dirección fue la síntesis de hexabenzocoroneno a partir de hexafenilbenceno.<sup>[17]</sup> Para ello, el compuesto de partida se calentó sobre Cu(111) a 710 K. Desde la publicación de este trabajo en 1999, la colaboración entre grupos de investigación especializados en química orgánica y en ciencia de superficies ha empleado esta aproximación para la preparación de nanografenos estructuralmente complejos, cuya síntesis y estudio en disolución habrían sido extremadamente complicadas.<sup>[18]</sup>

La ciclodeshidrogenación sobre superficie no solo permite realizar transformaciones similares a la reacción de Scholl, sino que además permite formar enlaces C–C anteriormente inalcanzables. En 2019, una colaboración entre nuestro grupo de investigación y el de Szymon Godlewski, describió la síntesis del nanografeno poroso **1** (Figura 2a).<sup>[19]</sup> El precursor del nanografeno, el poliareno **2**, se sintetizó mediante una reacción de ciclotrimerización catalizada por paladio del arilo generado a partir del triflato **3**. El compuesto **2** se sublimó sobre una superficie de oro, que se calentó para inducir dos tipos de ciclodeshidrogenaciones secuenciales. Primero, a 300 °C, se indujo la formación de enlaces C–C entre fenilos de cada una de las tres aspas de la molécula (señalados en azul, **4**). Posteriormente, el calentamiento a 370 °C condujo a la formación del producto **1** a través de la formación de enlaces C–C entre aspas (enlaces señalados en rojo, Figura 2a).<sup>[19]</sup> En la imagen de AFM se puede observar que este nanografeno no es plano, debido al impedimento estérico entre los hidrógenos de los poros. De hecho, es posible observar cómo el trifenileno central se encuentra más próximo a la superficie que el resto de la molécula (Figura 2b). La formación de anillos de tipo [14]anuleno mediante ciclodeshidrogenación no se ha observado en disolución, pero sí en otros sustratos similares sobre superficies.<sup>[20]</sup>

#### Acoplamientos tipo Ullmann y Glaser

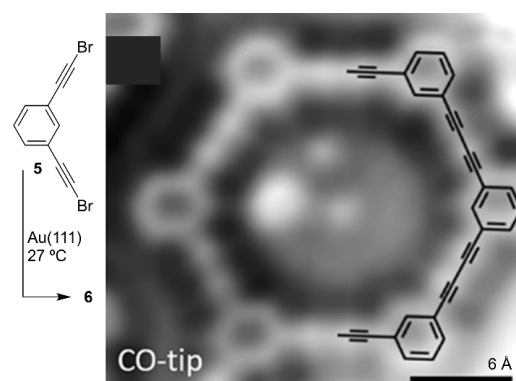
La reacción de Ullmann es un acoplamiento entre átomos de carbono arílicos a partir de los correspondientes haluros de arilo.<sup>[21]</sup> Esta reacción puede realizarse sobre superficie de dos maneras distintas; i) térmicamente, sobre sustratos metálicos<sup>[22,23]</sup> o ii) eléctricamente, mediante pulsos de voltaje aplicados con la punta de un microscopio STM.<sup>[5,24]</sup> Se trata de un acoplamiento muy empleado en síntesis sobre superficie, en especial, en combinación con la re-



**Figura 2.** a) Síntesis y b) imagen de AFM del nanografeno **1**. Reproducido de Ref. [18]. CC BY 3.0 license con permiso de la RSC.

acción de ciclodeshidrogenación para dar lugar a diferentes nanografenos<sup>[25]</sup> o incluso cintas de grafeno.<sup>[26]</sup> Otro acoplamiento que se ha demostrado sobre superficie es la reacción de Glaser. En este proceso dos alquinos terminales sufren un acoplamiento deshidrogenativo. Sin embargo, la eficiencia de esta reacción es moderada, ya que los alquinos terminales adsorbidos sobre superficies metálicas pueden participar en otras reacciones.<sup>[27]</sup>

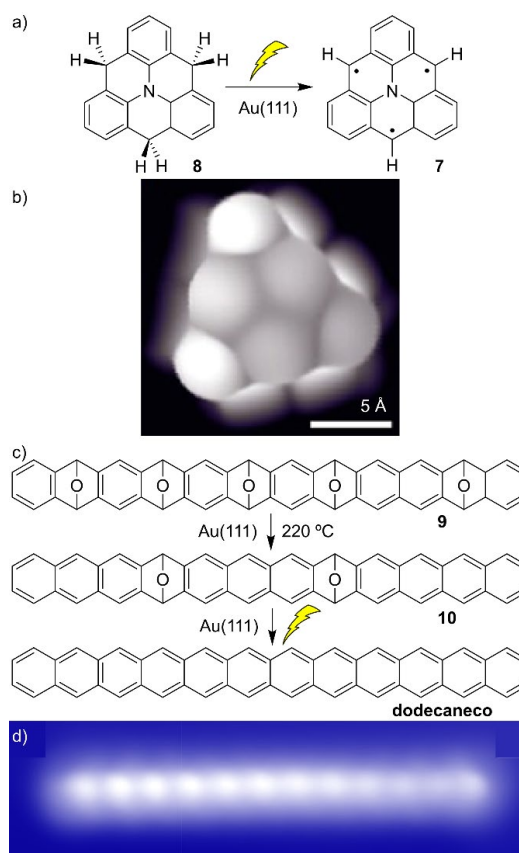
El acoplamiento Ullmann sobre superficies permite la formación de anillos de ciclobutadieno<sup>[28,29]</sup> y de anillos de ocho miembros.<sup>[30,31]</sup> Además, destaca por su utilidad en la síntesis de sistemas macrocíclicos, cuya preparación en disolución es complicada. Por ejemplo, el tratamiento térmico del dibromo-*meta*-terfenilo sobre una superficie de cobre conduce a la formación de un macrociclo hexagonal compuesto por 18 anillos bencénicos.<sup>[32]</sup> Otra variante de esta reacción son los acoplamientos de dibromuros geminales. Concretamente, la introducción de unidades  $=CBr_2$  en derivados de aceno permite generar carbenos que acoplan sobre superficie obteniéndose polímeros donde los núcleos aromáticos se unen mediante puentes de etinileno.<sup>[33]</sup> Por otro lado, un caso representativo del acoplamiento tipo Glaser se representa en la Figura 3. El compuesto **5** oligomeriza sobre una superficie de oro dando lugar, entre otras nanoestructuras, al macrociclo **6**.<sup>[34]</sup>



**Figura 3.** Síntesis e imagen de AFM del macrociclo **6**. Reproducido de Ref. [29]. Copyright (2018) con permiso de la ACS.

### Deshidrogenación y desoxigenación

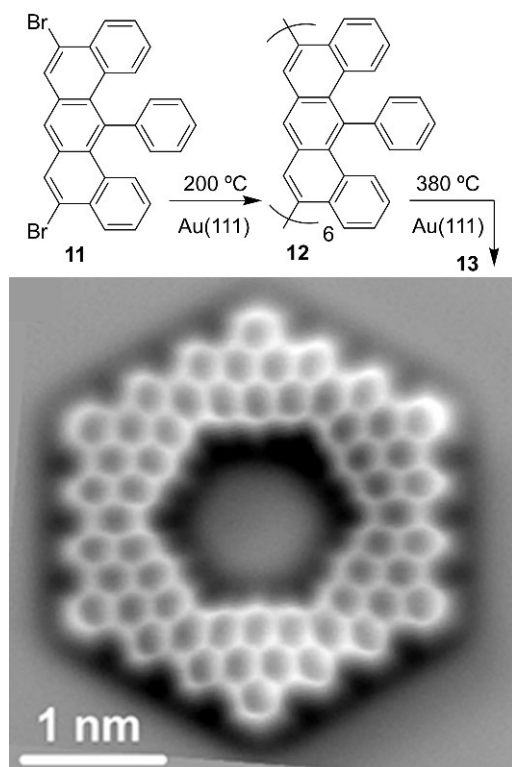
Una ventaja clave del estudio de moléculas sobre superficie en condiciones de UHV y a temperatura criogénica es la posibilidad de acceder a compuestos altamente reactivos, como los nanografenos de capa abierta (e.g. triangulenos). De hecho, la primera generación del [3]trianguleno se logró sobre superficie, mediante ruptura de enlaces C–H inducida por pulsos de voltaje desde la punta del STM, a partir de un precursor hidrogenado.<sup>[35]</sup> De forma similar se generó el azatrianguleno **7** a partir del precursor hidrogenado **8** (depositado sobre oro Figura 4).<sup>[36]</sup> Otros derivados de trianguleno se han obtenido combinando reacciones de acoplamiento C–C y deshidrogenaciones.<sup>[37-40]</sup>



**Figura 4.** a) Síntesis y b) imagen de AFM del azatrianguleno **7**. c) Síntesis y d) imagen de STM del dodecaceno. Reproducidas de Refs. [32] y 35. CC-BY 4.0 license y Copyright (2019) con permiso de la ACS.

La desoxigenación sobre superficie también se ha empleado para generar y estudiar especies moleculares que son demasiado reactivas para ser estudiadas bajo condiciones ambientales. Un caso especialmente interesante es la generación de acenos de gran tamaño, compuestos nanométricos resultado de la fusión lineal de anillos bencénicos que presentan propiedades electrónicas relevantes.<sup>[41,42]</sup> Por ejemplo, para la generación del dodecaceno se depositó por sublimación el precursor **9** sobre una superficie de oro, que se sometió a calentamiento para producir la desoxigenación parcial, originando epoxiacenos como el compuesto **10**. Seguidamente, la aplicación de pulsos de voltaje promovió la extrusión de los oxígenos restantes dando lugar al dodecaceno.<sup>[42]</sup> Debido a la estabilidad conferida por la superficie y las condiciones de ultra alto vacío ha sido posible estudiar las propiedades electrónicas de esta molécula. Más recientemente, se ha conseguido generar acenos superiores como el tridecaceno<sup>[43]</sup> y el pentadecaceno<sup>[44]</sup> mediante técnicas de síntesis sobre superficie. Por otro lado, la desoxigenación sobre superficie se empleó para generar el [19]estarfeno, un poliaréno en forma de estrella formado por la fusión *cata* de 19 anillos bencénicos.<sup>[45]</sup>

Otras reacciones conocidas en disolución han sido utilizadas en la síntesis sobre superficie de HPAs y nanografenos, como por ejemplo, las reacciones de extrusión de monóxido de carbono<sup>[46,47]</sup> y la reacción hexadehidro-Diels-Alder transanular.<sup>[48]</sup> Además, el uso combinado de varias de estas reacciones proporciona rutas sintéticas eficientes para la preparación de diversos nanografenos porosos.<sup>[49-52]</sup> Por ejemplo, la polimerización mediante reacciones de tipo Ullmann del compuesto **11** a 200 °C y posterior ciclodeshidrogenación del macrociclo **12** a 380 °C da lugar al nanografeno macrocíclico **13**,<sup>[50]</sup> cuya síntesis en disolución habría sido un desafío formidable.



**Figura 5.** Síntesis e imagen de AFM del nanografeno **13**. Reproducido de Ref. [40]. CC-BY license con permiso de la ACS.

Estos y otros avances evidencian el potencial de este campo. Por ejemplo, en 2022 se consiguió controlar la selectividad de una reacción en una molécula individual con un estímulo externo; es decir, se obtuvo uno u otro producto en función de la intensidad y la polaridad del pulso eléctrico aplicado.<sup>[6]</sup> Por otro lado, recientemente se ha desarrollado un protocolo que permite realizar ciclodeshidrogenaciones sobre una amplia variedad de superficies no metálicas, gracias a la utilización de hidrógeno atómico como catalizador.<sup>[53]</sup> Además, se están describiendo nuevos tipos de reactividad, no conocidas antes en disolución, que contribuyen a ampliar las herramientas sintéticas sobre superficie, como es el caso del acoplamiento indenilico.<sup>[54]</sup> El estudio del alcance de estos descubrimientos, así como la exploración de nuevas posibilidades, conforman un fructífero campo de investigación para los próximos años.

## Conclusiones

En los últimos años, las microscopías de sonda de barrido han dejado de ser meras técnicas de caracterización de superficies y nanoestructuras planas para mostrar signos claros de su potencial en diversas disciplinas científicas. De hecho, la integración de la ciencia de superficies con la química orgánica ha supuesto el inicio de un nuevo campo de investigación con capacidad para resolver problemas científicos relevantes en las ciencias moleculares. Inicialmente, las reacciones descritas sobre superficie eran versiones conocidas de las desarrolladas en disolución. Más recientemente se están incorporando reacciones completamente nuevas e inesperadas al arsenal de la síntesis sobre superficie. Globalmente, transformaciones químicas como la ciclodeshidrogenación, y los acoplamientos tipo Ullmann se han consolidado como procesos robustos sobre superficie, hasta el punto de permitir su combinación secuencial para la obtención de nanografenos con arquitecturas estructurales fascinantes. No cabe duda de que los avances recientes evidencian el enorme potencial de crecimiento de este campo de investigación en los próximos años.

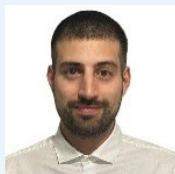
## Bibliografía

- [1] L. Gross, F. Mohn, N. Moll, P. Liljeroth, G. Meyer, *Science* **2009**, 325, 1110-1114, <https://doi.org/10.1126/science.1176210>.
- [2] L. Gross, F. Mohn, N. Moll, B. Schuler, A. Criado, E. Guitián, D. Peña, A. Gourdon, G. Meyer, *Science* **2012**, 337, 1326-1329, <https://doi.org/10.1126/science.1225621>.
- [3] S. Fatayer, F. Albrecht, Y. Zhang, D. Urbanas, D. Peña, N. Moll, L. Gross, *Science* **2019**, 365, 142-145, <https://doi.org/10.1126/science.aax5895>.
- [4] L. Gross, B. Schuler, N. Pavliček, S. Fatayer, Z. Majzik, N. Moll, D. Peña, G. Meyer, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, 57, 3888-3908, <https://doi.org/10.1002/anie.201703509>.
- [5] S.-W. Hla, L. Bartels, G. Meyer, K.-H. Rieder, *Phys. Rev. Lett.* **2000**, 85, 2777-2780, <https://doi.org/10.1002/anie.201703509>.
- [6] F. Albrecht, S. Fatayer, I. Pozo, I. Tavernelli, J. Repp, D. Peña, L. Gross, *Science* **2022**, 377, 298-301, <https://doi.org/10.1126/science.abo6471>.
- [7] L. Grill, M. Dyer, L. Lafferentz, M. Persson, M. V. Peters, S. Hecht, *Nat. Nanotechnol.* **2007**, 2, 687-691, <https://www.nature.com/articles/nnano.2007.346>.
- [8] S. Clair, D. G. de Oteyza, *Chem. Rev.* **2019**, 119, 4717-4776, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00601>.
- [9] C. Moreno, M. Vilas-Varela, B. Kretz, A. García-Leuke, M. V. Costache, M. Paradinas, M. Panighel, G. Ceballos, S. O. Valenzuela, D. Peña, A. Mugarza, *Science* **2018**, 360, 199-203, <https://doi.org/10.1126/science.125534>.

- [www.science.org/doi/10.1126/science.aar2009](http://www.science.org/doi/10.1126/science.aar2009).
- [10] Q. Fan, L. Yan, M. W. Tripp, O. Krejčí, S. Dimoshtenous, S. R. Kachel, M. Chen, A. S. Foster, U. Koert, P. Liljeroth, J. M. Gottfried, *Science* **2021**, 372, 852-856, <https://doi.org/10.1126/science.abg4509>.
  - [11] H. A. Staab, F. Diederich, *Chem. Ber.* **1983**, 116, 3487-3503, <https://doi.org/10.1002/cber.19831161021>.
  - [12] I. Pozo, Z. Majzik, N. Pavliček, M. Melle-Franco, E. Guitián, D. Peña, L. Gross, D. Pérez, *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, 141, 15488-15493, <https://doi.org/10.1021/jacs.9b07926>.
  - [13] B. Schuler, S. Collazos, L. Gross, G. Meyer, D. Pérez, E. Guitián, D. Peña, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2014**, 53, 9004-9006, <https://doi.org/10.1002/anie.201403707>.
  - [14] M. Vilas-Varela, S. Fatayer, Z. Majzik, D. Pérez, E. Guitián, L. Gross, D. Peña, *Chem. Eur. J.* **2018**, 24, 17697-17700, <https://doi.org/10.1002/chem.201805140>.
  - [15] I. Pozo, D. Pérez, D. Pérez en *Molecular Nanographenes: Synthesis, Properties, and Applications*, (Eds.: N. Martín, C. P. Nuckolls), Wiley, Germany, **2025**, pp. 363-380.
  - [16] R. S. Jassas, E. U. Mughal, A. Sadiq, R. I. Alsantali, M. M. Al-Rooqi, N. Naeem, Z. Moussa, S. A. Ahmed, *RSC Adv.* **2021**, 11, 32158-32202, <https://doi.org/10.1039/D1RA05910F>.
  - [17] K. Weiss, G. Beernink, F. Dötz, A. Birkner, K. Müllen C. H. Wöll, *Angew. Chem. Int. Ed.* **1999**, 38, 3748-3752, [https://doi.org/10.1002/\[SICI\]1521-3773\(19991216\)38:24%3C3748::AID-ANIE3748%3E3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/[SICI]1521-3773(19991216)38:24%3C3748::AID-ANIE3748%3E3.0.CO;2-O).
  - [18] M. Treier, C. A. Pignedoli, T. Laino, R. Rieger, K. Müllen, D. Passerone, R. Fasel, *Nat. Chem.* **2011**, 3, 61-67, <https://doi.org/10.1038/nchem.891>.
  - [19] R. Zuzak, I. Pozo, M. Englund, A. Garcia-Lekue, M. Vilas-Varela, J. M. Alonso, M. Szymanski, E. Guitián, D. Pérez, S. Godlewski, D. Peña, *Chem. Sci.* **2019**, 10, 10143-10148, <https://doi.org/10.1039/C9SC03404H>.
  - [20] K. Xu, J. Urgel, K. Eimre, M. Di Giovannantonio, A. Keerthi, H. Komber S. Wang, A. Narita, R. Berger, P. Ruffieux, C. A. Pignedoli, J. Liu, K. Müllen, R. Fasel, X. Feng, *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, 141, 7726-7730, <https://doi.org/10.1021/jacs.9b03554>.
  - [21] F. Ullmann, *Justus Liebigs Ann. Chem.* **1904**, 332, 38-81, <https://doi.org/10.1002/jlac.19043320104>.
  - [22] E. Charles, H. Sykes, Patrick Han, S. Alex Kandel, Kevin F. Kelly, Gregory S. McCarty, P. S. Weiss, *Acc. Chem. Res.* **2003**, 36, 945-953, <https://doi.org/10.1021/ar970286l>.
  - [23] S. Zint, D. Ebeling, T. Schlöder, S. Ahles, D. Mollenhauer, H. A. Wegner, A. Schirmeisen, *ACS Nano* **2017**, 11, 4183-4190, <https://doi.org/10.1021/acs.nano.7b01109>.
  - [24] Q. Zhong, A. Ihle, S. Ahles, H. A. Wegner, A. Schirmeisen, D. Ebeling, *Nat. Chem.* **2021**, 13, 1133-1139, <https://www.nature.com/articles/s41557-021-00773-4>.
  - [25] J. Hieuille, E. Carbonell-Sanromà, M. Vilas-Varela, A. Garcia-Lekue, E. Guitián, D. Peña, J. I. Pascual, *Nano Lett.* **2018**, 18, 418-423, <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b04309>.
  - [26] J. Cai, P. Ruffieux, R. Jaafar, M. Bieri, T. Braun, S. Blankenburg, M. Muoth, A. P. Seitsonen, M. Saleh, X. Feng, K. Müllen, R. Fasel, *Nature* **2010**, 466, 470-47, <https://doi.org/10.1038/nature09211>.
  - [27] J. Lawrence, M. S. G. Mohammed, D. Rey, F. Aguilar-Galindo, A. Berdonces-Layunta, D. Peña, D. G. de Oteyza, *ACS Nano* **2021**, 15, 4937-4946, <https://doi.org/10.1021/acs.nano.0c09756>.
  - [28] S. Kawai, K. Takahashi, S. Ito, R. Pawlak, T. Meier, P. Spijker, F. F. Canova, J. Tracey, K. Nozaki, A. S. Foster, E. Meyer, *ACS Nano* **2017**, 11, 8122-8130, <https://doi.org/10.1021/acs.nano.7b02973>.
  - [29] C. Sánchez-Sánchez, A. Nicolai, F. Rossel, J. Cai, J. Liu, X. Feng, K. Müllen, P. Ruffieux, R. Fasel, V. Meunier, *J. Am. Chem. Soc.* **2017**, 139, 17617-17623, <https://doi.org/10.1021/jacs.7b10026>.
  - [30] Z. Zeng, D. Guo, T. Wang, Q. Chen, A. Matěj, J. Huang, D. Han, Q. Xu, A. Zhao, P. Jelínek, D. G. de Oteyza, J.-S. McEwen, J. Zhu, *J. Am. Chem. Soc.* **2022**, 144, 723-732, <https://doi.org/10.1021/jacs.1c08284>.
  - [31] J. P. Calupitan, T. Wang, A. P. Paz, B. Álvarez, A. Berdonces-Layunta, P. Angulo-Portugal, R. Castrillo-Bodero, F. Schiller, D. Peña, M. Corso, D. Pérez, D. G. de Oteyza, *J. Phys. Chem. Lett.* **2023**, 14, 947-953, <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.2c03346>.
  - [32] Q. Fan, C. Wang, Y. Han, J. Zhu, W. Hieringer, J. Kuttner, G. Hilt, J. M. Gottfried, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2013**, 52, 4668-4672, <https://doi.org/10.1002/anie.201300610>.
  - [33] A. Sánchez-Grande, B. de la Torre, J. Santos, B. Cirera, K. Lauwaet, T. Chutora, S. Edalatmanesh, P. Mutombo, J. Rosen, R. Zbořil, R. Miranda, J. Björk, P. Jelínek, N. Martín, D. Écija, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2019**, 58, 6559-6563, <https://doi.org/10.1002/anie.201814154>.
  - [34] M. Liu, S. Li, J. Zhou, Z. Zha, J. Pan, X. Li, J. Zhang, Z. Liu, Y. Li, X. Qiu, *ACS Nano* **2018**, 12, 12612-12618, <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b07349>.
  - [35] N. Pavliček, A. Mistry, Z. Majzik, N. Moll, G. Meyer, D. J. Fox, L. Gross, *Nat. Nanotechnol.* **2017**, 12, 308-311, <https://doi.org/10.1038/nnano.2016.305>.
  - [36] T. Wang, A. Berdonces-Layunta, N. Friedrich, M. Vilas-Varela, J. P. Calupitan, J. I. Pascual, D. Peña, D. Casanova, M. Corso, D. G. de Oteyza, *J. Am. Chem. Soc.* **2022**, 144, 4522-4529, <https://doi.org/10.1021/jacs.1c12618>.
  - [37] S. Mishra, D. Beyer, K. Eimre, J. Liu, R. Berger, O. Gröning, C. A. Pignedoli, K. Müllen, R. Fasel, X. Feng, P. Ruffieux, *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, 141, 10621-10625, <https://doi.org/10.1021/jacs.9b05319>.
  - [38] J. Su, M. Telychko, P. Hu, G. Macam, P. Mutombo, H. Zhang, Y. Bao, F. Cheng, Z.-Q. Huang, Z. Qiu, S. J. R. Tan, H. Lin, P. Jelínek, F.-C. Chuang, J. Wu, J. Lu, *Sci. Adv.* **2019**, 5, eaav7717, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav7717>.
  - [39] S. Mishra, K. Xu, K. Eimre, H. Komber, J. Ma, C. A. Pignedoli, R. Fasel, X. Feng, P. Ruffieux, *Nanoscale* **2021**, 13, 1624-1628, <https://doi.org/10.1039/D0NR08181G>.
  - [40] J. Hieuille, S. Castro, N. Friedrich, A. Vegliante, F. R. Lara, S. Sanz, D. Rey, M. Corso, T. Frederiksen, J. I. Pascual, D. Peña, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, 60, 25224-25229, <https://doi.org/10.1002/anie.202108301>.
  - [41] J. Krüger, F. García, F. Eisenhut, D. Skidin, J. M. Alonso, E. Guitián, D. Pérez, G. Cuniberti, F. Moresco, D. Peña, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2017**, 56, 11945-11948, <https://doi.org/10.1002/anie.201706156>.
  - [42] F. Eisenhut, T. Kühne, F. García, S. Fernández, E. Guitián, D. Pérez, G. Trinquier, G. Cuniberti, C. Joachim, D. Peña, F. Moresco, *ACS Nano* **2020**, 14, 1011-1017, <https://doi.org/10.1021/acs.nano.9b08456>.
  - [43] R. Zuzak, M. Kumar, O. Stoica, D. Soler-Polo, J. Brabec, K. Pernal, L. Veis, R. Blicek, A. M. Echavarrén, P. Jelínek, S. Godlewski, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2024**, 63, e202317091, <https://doi.org/10.1002/anie.202317091>.
  - [44] Z. Ruan, J. Schramm, J. B. Bauer, T. Naumann, L. V. Müller, F. Sättel, H. F. Bettinger, R. Tonner-Zech, J. M. Gottfried, *J. Am. Chem. Soc.* **2025**, 147, 4862-4870, <https://doi.org/10.1021/jacs.4c13296>.
  - [45] J. Besteiro-Sáez, L. M. Mateo, S. Salaverría, T. Wang, P. Angulo-Portugal, J. P. Calupitan, J. Rodríguez-Fernández, A. García-Fuente, J. Ferrer, D. Pérez, M. Corso, D. G. de Oteyza, D. Peña, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2024**, 63, e202411861.

- <https://doi.org/10.1002/anie.202411861>.
- [46] M. Zugermeier, M. Gruber, M. Schmid, B. P. Klein, L. Ruppenthal, P. Müller, R. Einholz, W. Hieringer, R. Berndt, H. F. Bettinger, J. Michael Gottfried, *Nanoscale* **2017**, 9, 12461-12469, <https://doi.org/10.1039/C7NR04157H>.
- [47] J. I. Urgel, S. Mishra, H. Hayashi, J. Wilhelm, C. A. Pignedoli, M. Di Giovannantonio, R. Widmer, M. Yamashita, N. Hieda, P. Ruffieux, H. Yamada, R. Fasel, *Nat. Commun.* **2019**, 10, 861, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08650-y>.
- [48] J. Castro-Esteban, F. Albrecht, S. Fatayer, D. Pérez, L. Gross, D. Peña, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, 60, 26346-26350, <https://doi.org/10.1002/anie.202110311>.
- [49] Q. Fan, D. Martin-Jimenez, S. Werner, D. Ebeling, T. Koehler, T. Vollgraff, J. Sundermeyer, W. Hieringer, A. Schirmeisen, J. M. Gottfried, *J. Am. Chem. Soc.* **2020**, 142, 894-899, <https://doi.org/10.1021/jacs.9b10151>.
- [50] M. Di Giovannantonio, X. Yao, K. Eimre, J. I. Urgel, P. Ruffieux, C. A. Pignedoli, K. Müllen, R. Fasel, A. Narita, *J. Am. Chem. Soc.* **2020**, 142, 12046-12050, <https://doi.org/10.1021/jacs.0c05268>.
- [51] I. C.-Y. Hou, Q. Sun, K. Eimre, M. Di Giovannantonio, J. I. Urgel, P. Ruffieux, A. Narita, R. Fasel, K. Müllen, *J. Am. Chem. Soc.* **2020**, 142, 10291-10296, <https://doi.org/10.1021/jacs.0c03635>.
- [52] F. Xiang, S. Maisel, S. Beniwal, V. Akhmetov, C. Ruppenstein, M. Devarajulu, A. Dörr, O. Papaianina, A. Görling, K. Y. Amsharov, S. Maier, *Nat. Chem.* **2022**, 14, 871-876, <https://doi.org/10.1038/s41557-022-00968-3>.
- [53] R. Zuzak, P. Dabczynski, J. Castro-Esteban, J. I. Martínez, M. Englund, D. Pérez, D. Peña, S. Godlewski, *Nat. Commun.* **2025**, 16, 691, <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54774-1>.
- [54] K. Biswas, J. Janeiro, A. Gallardo, M. Lozano, A. Barragán, B. Álvarez, D. Soler-Polo, O. Stetsovych, A. P. Solé, K. Lauwaet, J. M. Gallego, D. Pérez, R. Miranda, J. I. Urgel, P. Jelínek, D. Peña, D. Écija, *Nat. Synth.* **2025**, 4, 233-242, <https://doi.org/10.1038/s44160-024-00665-8>.

### Iago Pozo



*Centro Singular de Investigación en Química  
Biológica e Materiais Moleculares (CiQUS)  
y Departamento de Química Orgánica,  
Universidade de Santiago de Compostela*

C-e: [iago.pozo.miguez@usc.es](mailto:iago.pozo.miguez@usc.es)  
ORCID: 0000-0003-3113-6368

Iago obtuvo su máster y doctorado en la USC (ambos con Premio Extraordinario, 2015 y 2020), trabajando en el CiQUS bajo la supervisión de los profesores Dolores Pérez y Diego Peña. Realizó estancias predoctorales en los grupos de los profesores Alois Fürstner y Miquel A. Pericàs. Completó sus estudios postdoctorales en la Universidad de Oxford, entre los grupos de Lapo Bogani y Harry L. Anderson. En 2022 recibió el Premio de Investigación Ernesto Viéitez Cortizo (Real Academia Gallega de Ciencias). En 2024 regresó al CiQUS como investigador Margarita Salas y, poco después, consiguió una Beca Postdoctoral Marie Curie.

### Dolores Pérez



*Centro Singular de Investigación en Química  
Biológica e Materiais Moleculares (CiQUS)  
y Departamento de Química Orgánica,  
Universidade de Santiago de Compostela*

C-e: [dolores.perez@usc.es](mailto:dolores.perez@usc.es)  
ORCID: 0000-0001-5057-5599

Dolores realizó su doctorado en la USC bajo la dirección de Enrique Guitián y Luis Castedo. Fue becaria posdoctoral MEC-Fulbright en UC Berkeley en el grupo de Peter Vollhardt (1992-1993), y científica visitante en el MIT con Stephen Buchwald (1996). Se incorporó a la USC en 1995 como Ayudante de Universidad, siendo nombrada Profesora Titular en 2000 y Catedrática en 2019. Fue pionera en el descubrimiento de la participación de arinos en catálisis metálica y actualmente desarrolla nueva metodología sintética para el acceso a sistemas policíclicos conjugados no convencionales. Ha sido directora Comisaria (2010-2014) y Directora Adjunta (2014-2025) del CiQUS.

### Diego Peña



*Centro Singular de Investigación en Química  
Biológica e Materiais Moleculares (CiQUS) y  
Departamento de Química Orgánica, Universidade  
de Santiago de Compostela*

C-e: [diego.pena@usc.es](mailto:diego.pena@usc.es)  
ORCID: 0000-0003-3814-589X

Diego obtuvo el doctorado en la USC en 2001 bajo la dirección de Enrique Guitián y Dolores Pérez. Realizó una estancia postdoctoral en el grupo de Ben L. Feringa (Universidad de Groningen, 2002-2003). Regresó a la USC en 2004 como investigador Ramón y Cajal. Fue nombrado Profesor Titular en 2008 y Catedrático en 2020. También en 2020 obtuvo una ERC Synergy Grant (MoldAM) y en 2024 obtuvo una plaza Oportunus en el CiQUS, donde es Director Científico. Ha recibido la medalla Ignacio Ribas (2018) y el Premio a la Excelencia Investigadora de la RSEQ (2023). Investiga en síntesis de nanografenos, química sobre superficies y reacciones de moléculas individuales.