

CARBONILOS METÁLICOS:

Mucho más que viejas reminiscencias del pasado.

Hemos querido contribuir a este número especial de Anales de Química con un artículo divulgativo sobre un área, en nuestra opinión emblemática, de la Química Inorgánica que es objeto de estudio desde años antes de la fundación de nuestra Sociedad, y que, a pesar de su antigüedad, sigue conociendo en nuestros días una actividad inusitada. Es un hecho incuestionable que, a pesar de su naturaleza estrictamente inorgánica, la agrupación M-CO resulta extraordinariamente familiar para muchos químicos de diferente formación e intereses científicos, y que su generación, su estudio y su uso, continuarán siendo en los próximos años parte importante de su labor investigadora. No se pretende en este artículo efectuar una descripción detallada de la química de estos compuestos, que el lector interesado puede encontrar con facilidad en textos, monografías o artículos de revisión especializados, sino mostrar algunos aspectos de la misma que ilustren la relevancia del campo.

El monóxido de carbono se conoce desde muy antiguo. Gas incoloro e inodoro, y muy tóxico, debe su notoriedad química a la capacidad que posee para unirse a los átomos de los metales de transición, formando moléculas bien definidas, propiedad que resulta insólita y mueve a la reflexión, ya que, por un lado el CO es una molécula casi apolar y de muy exigua basicidad de Lewis, y por otro el átomo del metal de muchos carbonilos metálicos se encuentra en estado de oxidación cero, es decir, el mismo que en su forma elemental, situación en la que muchos de estos elementos son materiales refractarios, y de muy altos puntos de fusión y ebullición. Tal aparente contradicción se explica, como se discutirá más adelante, merced a la complementariedad electrónica que se manifiesta entre los átomos de los metales de transición y la molécula de monóxido de carbono.

La afinidad química entre el CO y los metales de transición se puso por primera vez de manifiesto en 1868, con la preparación del complejo $\text{PtCl}_2(\text{CO})_2$ (Schützenberger), pero sobre todo con el aislamiento por Mond en 1890 del primer carbonilo binario, el $\text{Ni}(\text{CO})_4$, formado sorprendente e inesperadamente por reacción de níquel metálico, en estado de fina división,



Manuel L. Poveda

Instituto de Investigaciones Químicas,
Departamento de Química Inorgánica
Consejo Superior de Investigaciones
Científicas-Universidad de Sevilla,
C/ Américo Vespucio s/n, Isla de la
Cartuja, 41092 Sevilla



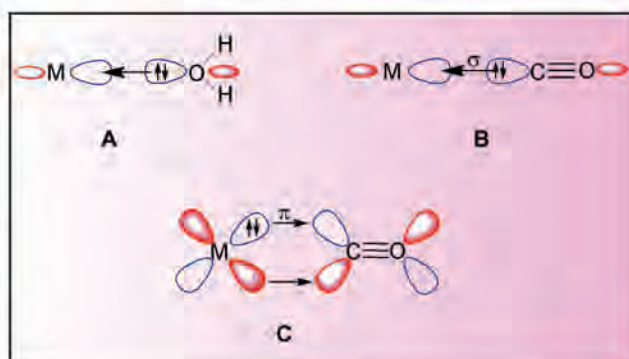
Ernesto Carmona

con monóxido de carbono. Este hallazgo supuso el comienzo del estudio sistemático de los carbonilos metálicos y fue seguido casi de inmediato por la preparación del $\text{Fe}(\text{CO})_5$ (Mond y Berthelot, de forma independiente) y por el desarrollo por Mond de un proceso industrial para el refinamiento del níquel, basado en la sorprendente volatilidad del $\text{Ni}(\text{CO})_4$ (p.e. 43°C), que todavía se encuentra en uso en el Reino Unido. En años posteriores Mond y col. prepararon

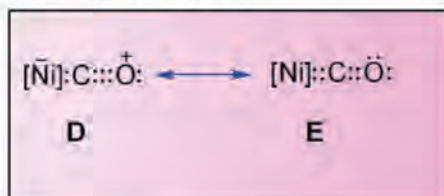
los complejos $\text{Co}_2(\text{CO})_8$ y $\text{Mo}(\text{CO})_6$, y aunque todos estos hallazgos suscitaron el interés de los químicos por la, entonces aún exótica, familia de los carbonilos metálicos, no parece arriesgado afirmar que fueron los trabajos de la escuela de Hieber (véase, por ejemplo, H. Behrens, *J. Organomet. Chem.* **1975**, *94*, 139), desarrollados a partir de 1931, los que le proporcionaron un esplendor que se ha mantenido intacto hasta nuestros días, en buena medida como consecuencia de las múltiples innovaciones que se han ido sucediendo con el transcurso de los años.

A diferencia de los complejos de tipo Werner, en los que el ligando actúa como donador σ (A), en los carbonilos metálicos el CO se manifiesta además como aceptor π . El mecanismo del enlace es sinérgico: la interacción $d\pi(\text{M}) \rightarrow \pi^*(\text{CO})$, denominada comúnmente retrodonación (C), aumenta de modo global la densidad electrónica sobre el CO e incrementa su basicidad de Lewis. Y recíprocamente, los efectos de la componente σ del enlace (B) refuerzan la interacción π .

Numerosos estudios teóricos revelan que en la gran mayoría de los carbonilos metálicos la retrodonación es



más importante que la componente σ , representando una excepción, en este sentido, los carbonilos catiónicos como el $[\text{Ir}(\text{CO})_6]^{3+}$, en los que la σ es la componente primordial (véase más adelante). Desde el punto de vista histórico, es obligado mencionar que al menos la idea básica de la retrodonación se remonta a la década de los años 1930, a pesar de que, con frecuencia, el modelo de enlace expuesto se identifica con el propuesto en un principio por Dewar, y poco después por Chatt y Duncanson a comienzos de la década de 1950 para las uniones $\text{M}-\text{C}_2\text{H}_4$. La determinación en 1935 (L.O. Brockway, P.C. Cross, *J. Chem. Phys.* **1935**, *3*, 828) de la estructura molecular del $\text{Ni}(\text{CO})_4$ mediante difracción de electrones desveló una $d(\text{Ni}-\text{CO})$ inferior en 0.18 Å a la esperada para un enlace simple, acortamiento que fue atribuido a la resonancia entre las estructuras **D** y **E**, resultando el enlace doble entre el Ni y el CO de "la compartición de un par de electrones 3d del Ni con la molécula de CO".



Como se mencionará de inmediato, se conocen muchos compuestos polinucleares (en adelante se designarán con el término inglés *cluster*) en los que el CO actúa como ligando puente entre dos o más átomos metálicos, que están además unidos de modo directo (M-M). El modelo de enlace sinérgico es también aplicable a estas situaciones, como se ilustra para la distribución binuclear mediante las representaciones **F** y **G**, que informan asimismo de la influencia de las componentes σ y π de los enlaces $\text{M}_2(\text{CO})$ en el enlace metal-metal (nótese que **G** supone interacción M-M antienlazante). En estos compuestos *cluster* el CO puede adoptar diferentes modos de coordinación (**Figura 1**), algunos de los cuales requieren la participación adicional del átomo de oxígeno en el enlace de los átomos del metal con el monóxido de carbono.

La diversidad estructural de los carbonilos metálicos es extraordinaria y constituye un rasgo distintivo de estos compuestos. Abarca desde las geometrías simples (como la tetraédrica del $\text{Ni}(\text{CO})_4$, la de bipirámide trigonal del $\text{Fe}(\text{CO})_5$, o la octaédrica del $\text{Cr}(\text{CO})_6$) hasta las muy complejas, propias de los *clusters* de alta nuclearidad (**Figura 2**).

Aunque muchas de estas estructuras se han determinado mediante difracción de rayos X, resulta pertinente destacar la importante función desempeñada por la espectroscopía de infrarrojo (IR) en el estudio de estos compuestos, no sólo para diferenciar entre los modos de coordinación terminal y puente (**Figura 3a**), sino también para predecir la geometría de las moléculas mediante la aplicación de argumentos sencillos, basados en la simetría molecular (**Figura 3b**) cuyas ventajas ha puesto una y otra vez de manifiesto F.A. Cotton

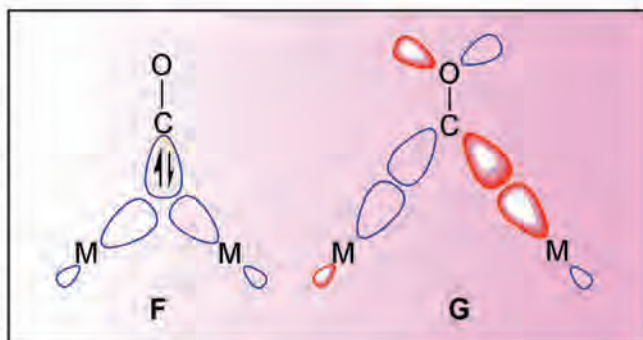


Figura 1. Modos de coordinación del monóxido de carbono

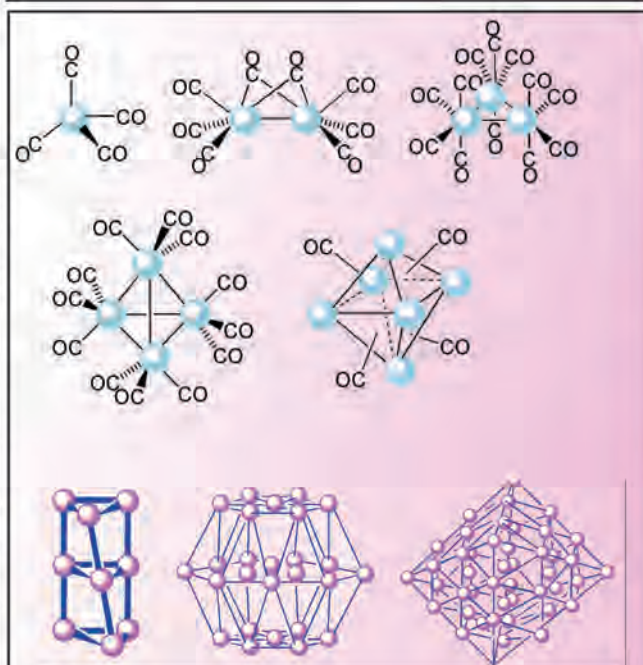
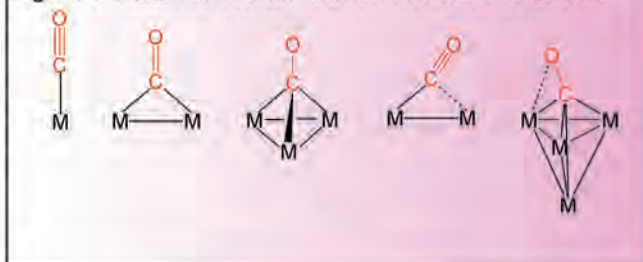


Figura 2. Estructura de algunos carbonilos metálicos, mono y polinucleares (para mayor claridad, en las tres últimas sólo se han representado las posiciones de los átomos metálicos).

(*Chemical Applications of Group Theory*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 1990). Aunque sea a título anecdótico, la aplicación de la espectroscopía de IR al estudio de los carbonilos $\text{Ni}(\text{CO})_3(\text{PR}_3)$, constituye la base de la clasificación de Tolman de los ligandos fosfina según su capacidad donadora (**Figura 3c**). De igual importancia, sobre todo para el estudio del comportamiento dinámico de los compuestos de tipo *cluster*, ha sido la resonancia magnética nuclear (RMN) de

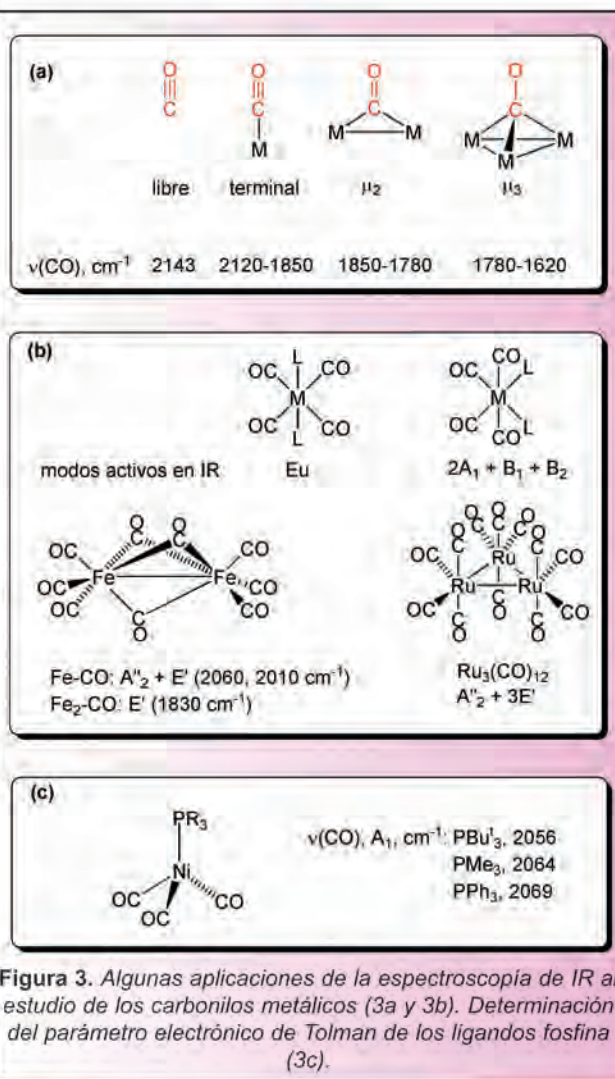


Figura 3. Algunas aplicaciones de la espectroscopia de IR al estudio de los carbonilos metálicos (3a y 3b). Determinación del parámetro electrónico de Tolman de los ligandos fosfina (3c).

Tabla 1. Ejemplos de aplicación de las reglas de Wade a los carbonilos de tipo Cluster.

Compuesto	Núm. total de e	p.e.enlace poliédrico	Núm. vértices	Estructura
Os ₅ (CO) ₁₆	72	6	5	closo (bip. trig.)
Rh ₆ (CO) ₁₆	86	7	6	closo-O _h (O _h = octaédrica)
[Os ₄ (CO) ₁₂ N] ⁻	62	7	6	aracno-O _h
Os ₇ (CO) ₂₁	84	7	6	closo-O _h + 1 vért.
[Os ₁₀ (CO) ₂₄ C] ²⁻	134	7	6	closo-O _h + 4 vért.

¹³C, que se ha utilizado para la investigación de numerosísimos sistemas fluxionales en los que se producen reorganizaciones del esqueleto básico del cluster, intercambio mutuo de las posiciones de grupos CO inequivalentes, u otras transformaciones (B.F.G. Jonson, R.E. Benfield, *Transition Metal Clusters*, John Wiley & Sons, New York, 1980).

Las estructuras que presentan los carbonilos metálicos mono y polinucleares se pueden explicar con la ayuda de modelos de enlace bien establecidos. Como otros compuestos complejos que poseen ligandos aceptores π , los carbonilos metálicos más sencillos cumplen de

manera estricta la regla de los 18 e. Así, el Os₃(CO)₁₂ tiene una geometría triangular (Figura 2) en la que cada uno de los átomos metálicos adquiere la configuración de tipo gas noble mediante la formación de dos enlaces Os-Os, cada uno de dos centros y dos electrones (2c-2e). De manera análoga, en el Ir₄(CO)₁₂ (Figura 2), cada átomo de Ir participa en tres enlaces de 2c-2e. Sin embargo, en los clusters de mayor nuclearidad, con frecuencia denominados *deltaedros*, en referencia a las caras triangulares de los poliedros que definen sus estructuras, la situación es más compleja, en parte debido a que no todos los metales de transición se adaptan a la regla de los 18 e (por ejemplo, los elementos Ni, Pd, Pt, Rh e Ir forman muchos complejos de 16 e de geometría plana cuadrada, y otros como Cu, Ag, Au o Hg dan lugar a estructuras lineales de 14 e).

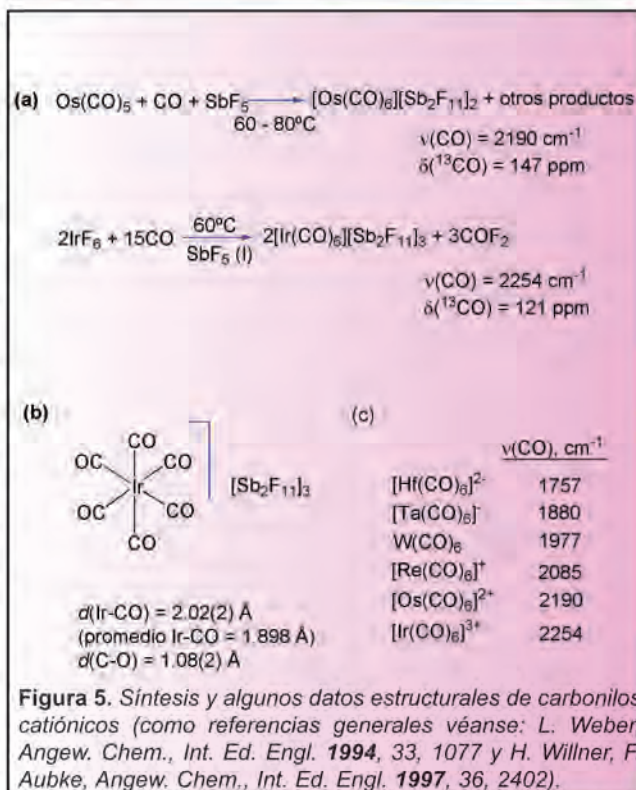
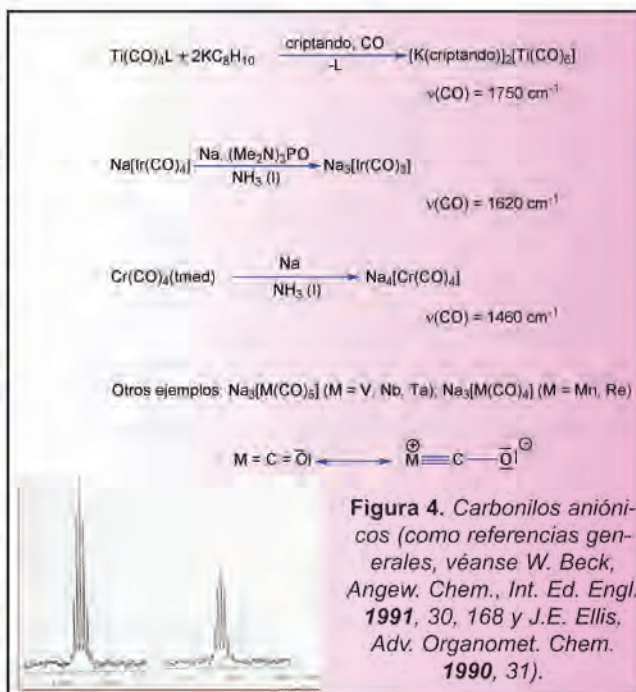
Para explicar la estructura y las características electrónicas de estos clusters de nuclearidad elevada suelen emplearse las denominadas *Reglas de Wade*, en realidad desarrolladas de forma independiente por Wade y Mingos. Estas reglas usan con profusión la *Analogía Isolobular* de Hoffman, y ponen de manifiesto la relación estructural que existe entre los clusters de los metales de transición y los boranos y carboranos superiores (de hecho incluyen también a los propios compuestos organometálicos, de tal manera que la estructura del (η^6 -C₆H₆)Cr(CO)₃ se podría definir como de tipo *nido* derivada de una bipirámide hexagonal, con una posición axial vacía y la otra ocupada por el fragmento Cr(CO)₃). El enlace entre los átomos metálicos que componen el esqueleto de un cluster deltaédrico se explica mediante interacciones multicéntricas de 2e. Un fragmento por ejemplo de composición M(CO)₃ (Fe, Ru, Os) es *isolobular* (contribuye al enlace poliédrico con el mismo número de orbitales, de simetría análoga) de un fragmento BH (un orbital *radial* y dos *tangenciales*) y es asimismo *seudoisoelectrónico* con él (aporta el mismo número de electrones, $8 + 3 \times 2 - 12 = 2e$, M(CO)₃; $3 + 1 - 2 = 2e$, en el caso del BH). De acuerdo con estas reglas, en el compuesto Rh₆(CO)₁₆ (Figura 2) hay 7 pares de electrones para el enlace entre los 6 átomos de Rh, situación electrónica que resulta óptima para un poliedro de seis vértices, es decir, el octaedro, con lo que el compuesto tiene estructura *closo* (cerrada, a saber, todos los vértices ocupados). En la Tabla 1 se encuentran algunos ejemplos de aplicación de estas reglas, que, como se sabe, se pueden extender para explicar las estructuras de los clusters que consisten de un poliedro central, al que se añaden uno o varios fragmentos M(CO)_n (en general ML_n), dispuestos a su alrededor en posiciones que se proyectan sobre los centros de sus caras (átomos "capping"; "capping principle" o "capping rule"). La Tabla 1 contiene también algunos ejemplos de estas estructuras.

Desde las décadas de los años 1950 y 1960 hasta nuestros días, los químicos organometálicos han utilizado el CO como ligando auxiliar, a fin de estabilizar

compuestos con grupos funcionales en sus inicios poco comunes, tales como los M-alquilo, M-carbeno, etc., o de observar algunas transformaciones de interés (por ejemplo, la activación de los enlaces C-H de los hidrocarburos). En la misma línea, han desarrollado numerosos procesos catalíticos que transcurren en fase homogénea (hidroformilación de los alquenos, carbonilación del metanol, etc.). Demorando, por el momento, la discusión de estos, conviene destacar algunos hallazgos recientes y muy significativos dentro de la propia familia, que han realzado la importancia de los carbonilos y los han encumbrado hasta una posición aún más relevante, si cabe, en el ámbito de la Química Inorgánica.

Durante el comienzo de la década de 1990, Ellis y col. prepararon y caracterizaron numerosos carbonilos moleculares aniónicos, $[M(CO)_n]^{x-}$, entre los que se encuentran algunos que poseen tres y hasta cuatro cargas negativas (compuestos de Ellis o carbonilos superreducidos). En la **Figura 4** se resumen algunos aspectos de interés de estos compuestos, que obedecen la regla de los 18 e, y que, como es previsible, son de muy difícil síntesis, al exigir el empleo de reductores muy enérgicos y de condiciones de reacción con ausencia de oxígeno y agua incluso al nivel de trazas. Son, por sí mismos, muy reductores, arden de manera espontánea en contacto con el aire, y pueden explotar, sin causa externa aparente, incluso bajo atmósfera de Ar. La elevada carga negativa de sus moléculas exalta la componente de retrodonación, $M(d\pi) \rightarrow CO(\pi^*)$, del enlace, como se manifiesta en la observación de frecuencias (números de onda en la **Figura 4**) muy bajas de las vibraciones de tensión de los enlaces carbono-oxígeno, que llegan a ser casi del orden esperado para las uniones simples de estos átomos. La **Figura 4** recoge también el espectro de RMN de ^{49}Ti del anión $[Ti(^{13}CO)_6]^{2-}$, que revela la equivalencia de los ligandos carbonilo; tanto esta observación como la escasa anchura ($w_{1/2} = 7$ Hz) de la señal de resonancia de este núcleo cuadrupolar (^{49}Ti , $I = 7/2$), están de acuerdo con la geometría octaédrica que se propone para esta molécula.

En abierto contraste con esta situación de evidente riqueza electrónica, en fechas asimismo muy recientes, Willner, Aubke y col. han descrito numerosos complejos catiónicos $[M(CO)_n]^{x+}$, en los que x puede llegar a ser 2 o incluso 3, y entre los que se cuentan los derivados de mercurio $[Hg(CO)_2]^{2+}$ y $[Hg_2(CO)_2]^{2+}$. Estas sustancias poseen una estabilidad térmica elevada y funden sin descomponerse (p.f. ~ 140 - 200°C), debiendo, a buen seguro, su estabilidad, e incluso su propia existencia, a la bajísima nucleofilia de los aniones que compensan su carga positiva (por lo general $[Sb_2F_{11}]^-$ o $[Pt(SO_3F)_6]^{2-}$). La **Figura 5** recoge la síntesis de algunos de estos compuestos, así como ciertos datos estructurales de interés. La comparación de $\nu(CO)$ que en ella se incluye (**Figura 5c**, modos de simetría t_{1u} o f_{1u}) es, sin asomo de duda, llamativa, ya que revela una

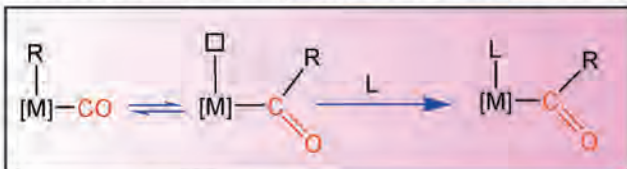


variación de nada menos que 500 cm^{-1} al pasar desde el carbonilo aniónico de Hf al carbonilo catiónico de Ir. Como pone de manifiesto el reciente análisis teórico de Diefenbach, Bickelhaupt y Frenking (*J. Am. Chem. Soc.* **2000**, 122, 6449) en esta serie de complejos la retrodonación π , $M \rightarrow CO$, disminuye, como por otra parte es de esperar, al aumentar el estado de oxidación formal del metal, mientras que la componente σ , $M \leftarrow CO$, aumenta en el mismo sentido, de tal manera que en el compuesto $[Ta(CO)_6]^{2-}$ la interacción π es, con creces, la componente fundamental del enlace, al tiempo que en los derivados catiónicos de Re, Os e Ir es la σ la

que predomina.

Si resulta llamativo que las especies $[\text{Hg}(\text{CO})_2]^{2+}$ y $[\text{Hg}_2(\text{CO})_2]^{2+}$ no se hayan descrito hasta hace pocos años, no sorprende menos que los complejos carbonílicos de los elementos de los bloques *s*, *p* y *f* de la tabla periódica hayan sido también desconocidos, o casi desconocidos, hasta fechas muy recientes. La **Figura 6** resume los avances más significativos acaecidos en este campo, que incluyen la caracterización de los complejos $[(\eta^5\text{-C}_5\text{Me}_5)_2\text{M}(\text{CO})]$, para *M* = Si y Ca. Estos compuestos, aunque caracterizados de modo inequívoco, pierden con facilidad el CO coordinado, cambio químico que también es causa de la inestabilidad del primer carbonilo descrito para un elemento *f*, el complejo de uranio $(\eta^5\text{-C}_5\text{H}_4\text{SiMe}_3)_3\text{U}(\text{CO})$, preparado por Andersen y col. (*J. Am. Chem. Soc.* **1986**, *108*, 335). El cambio, sin duda afortunado, del ligando sililciclopentadienilo por el $\text{C}_5\text{Me}_4\text{H}$, ha permitido preparar un carbonilo de uranio estable respecto a la pérdida del CO coordinado, el complejo $(\eta^5\text{-C}_5\text{Me}_4\text{H})_3\text{U}(\text{CO})$, obtenido en los laboratorios de los autores de este artículo, y caracterizado mediante difracción de rayos X (**Figura 6c**), determinación que lo convierte en el primer (y hasta el presente el único) carbonilo de un metal de las series de transición *f*, caracterizado mediante esta técnica (J. Parry, E. Carmona y otros autores, *J. Am. Chem. Soc.* **1995**, *117*, 2644). Este complejo presenta $\nu(\text{CO})$ a 1880 cm^{-1} , observación que sugiere una retrodonación importante desde la agrupación $\text{Cp}'_3\text{U}$ a la molécula de CO.

Si por su interés intrínseco los carbonilos merecen una posición de privilegio en el ámbito de la Química Inorgánica, no son menos relevantes sus múltiples aplicaciones en síntesis orgánica, estequiométrica o, sobre todo, catalítica. Muchas de estas reacciones tienen, como una de sus etapas elementales, a la bien conocida inserción migratoria del CO en un enlace metal de transición-carbono, cuyo mecanismo fue desvelado por Calderazzo (*J. Organomet. Chem.* **1967**, *10*, 101), quien demostró que es un proceso intramolecular, en el que el grupo R emigra hacia el monóxido de carbono coordinado. El ataque nucleófilo al átomo de C de



una función M-CO, en esta ocasión por un compuesto organolítico, LiR , es también una reacción de gran importancia histórica, puesto que sirvió de base a Fischer y col. para la preparación de los primeros carbenos metálicos (*Angew. Chem., Int. Ed. Engl.* **1964**, *3*, 580), sustancias de gran utilidad en síntesis orgánica,

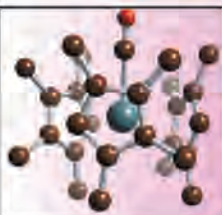
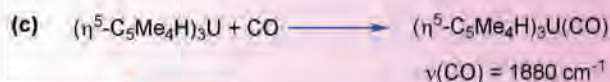
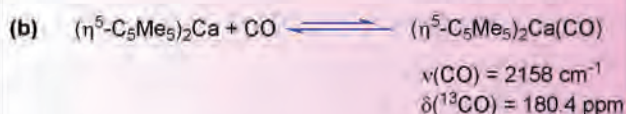
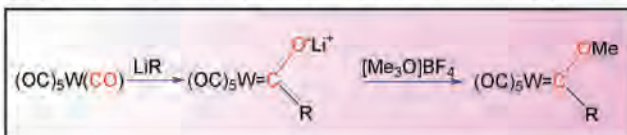
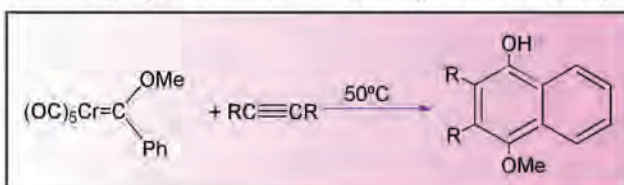
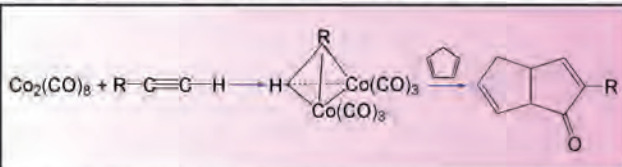


Figura 6. Complejos neutros del CO con elementos *p*, *s*, y *5f* (como referencia general véase J.E. Ellis, W. Beck, *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.* **1995**, *34*, 2489).

protagonistas de innumerables transformaciones de interés, entre ellas la reacción de benzoanelación de Dötz, que se resume de modo esquemático a continuación (*Angew. Chem., Int. Ed. Engl.* **1975**, *87*, 672).



Otra reacción de ciclación muy notable y de evidente importancia sintética es la de Pauson-Khand (estequiométrica o catalítica), que permite la obtención de ciclopentenonas en una sola etapa, a partir de un alquino, un alqueno y CO, utilizando el $\text{Co}_2(\text{CO})_8$ como catalizador (*Tetrahedron*, **1985**, *41*, 5855). En unos casos, como el que se muestra a continuación,



se aísla primero el complejo formado entre el alquino y el $\text{Co}_2(\text{CO})_8$, y con posterioridad se añade la cantidad estequiométrica del alqueno. La transformación es regio y estereo-específica, y cuando intervienen alquinos sustituidos, el grupo CO suele ocupar en el producto final la posición contigua al sustituyente más voluminoso del alquino.

Se conocen además otras transformaciones en las que participan los complejos M-CO, que transcurren bajo condiciones de catálisis homogénea o heterogénea, y sirven de base a procesos que son ya comerciales, o que pueden llegar a serlo en un futuro próximo. Por la naturaleza de este artículo sólo se considerarán, y con la obligada brevedad, el proceso *oxo* o de *hidroformilación* de alquenos, y la carbonilación del metanol a ácido acético (procesos *Monsanto* y *Cativa*). En la

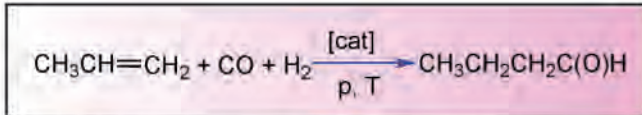


Figura 7 se han resumido otras transformaciones importantes.

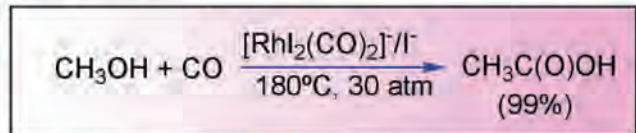
El proceso catalítico homogéneo más antiguo y de mayor volumen comercial es el de hidroformilación de los alquenos, es decir, la adición de CO y H₂ (formalmente -H y -C(O)H) a una olefina para producir un aldehído.

Las múltiples aplicaciones del aldehído *n*-butírico hacen de la hidroformilación del propeno uno de los ejemplos más relevantes, aunque es también pertinente mencionar la síntesis de los denominados "alcoholes grasos" (o también "alcoholes detergentes") a partir de alquenos terminales (C₈ o superiores), en un proceso combinado de hidroformilación y reducción efectuados por el mismo catalizador (por ejemplo, el Co₂(CO)₈) o por el catalizador ligeramente modificado. Estos al-

coholes se emplean en gran escala para la síntesis de los detergentes biodegradables y para la de los ésteres adípicos.

El proceso oxo fue descubierto por Roelen en 1938 (Ruhrchemie, Co₂(CO)₈ como precursor catalítico). En 1976, Union Carbide desarrolló un proceso comercial que usa un catalizador de rodio, generado a partir del complejo RhH(CO)(PPh₃)₂, capaz de convertir al propeno en *n*-butanal a 100°C y 10-20 atm, con una selectividad superior al 90% hacia el aldehído lineal. El empleo de la sal de sodio de la trifenilfosfina trisulfonada en *meta* ha supuesto una modificación importante, comercializada por Ruhrchemie en 1984, ya que permite solubilizar al catalizador en agua, y reduce además de forma apreciable las pérdidas de rodio y las de propeno.

Casi con toda probabilidad, el proceso más emblemático de entre los que hacen uso de los compuestos organometálicos en catálisis homogénea es el denominado proceso *Monsanto*, que fabrica ácido acético a partir de metanol y monóxido de carbono, en cantidades



del orden de millones de toneladas anuales de producto. La especie activa es el dicarbonilo [RhI₂(CO)₂]⁻, y aunque el efecto neto de la reacción global es la inserción del CO en el enlace H₃C-OH, el proceso es complejo y requiere la adición de HI como cocatalizador, que convierte al MeOH en MeI, el cual se adiciona de forma oxidante al complejo de Rh(I), en la etapa que controla la velocidad de la reacción. En 1996, British Petroleum puso en funcionamiento el proceso *Cativa*, que opera con mayor eficacia que el Monsanto y está sustituyendo gradualmente a éste. Utiliza como catalizador el compuesto análogo de iridio, [IrI₂(CO)₂]⁻, también en presencia de I⁻ como catalizador, y en el nivel molecular se diferencia de aquél en que la etapa controlante es la inserción migratoria del CO en el enlace Ir-Me del intermedio IrMe(I)₂(CO)₂.

A modo de epílogo, cabe reiterar que las investigaciones realizadas en los últimos lustros con los carbonilos metálicos y sus derivados han mejorado de manera muy significativa nuestro conocimiento de estas sustancias, y se han traducido, en muchos casos, en el desarrollo de procesos comerciales de gran importancia económica. La estrecha relación que existe entre el CO y el CO₂, y entre estas sustancias y otras como el

CH₃OH o el CH₂O, junto con la necesidad de desarrollar nuevas fuentes de energía, que puedan convertirse en alternativas competitivas de los combustibles fósiles,

contribuyen a delinear un panorama muy esperanzador para este campo de trabajo en el futuro inmediato. Más de 100 años después de sus inicios, la química de la agrupación M-CO mantiene intacto su atractivo,

y ejerce sobre nosotros una fascinación que en modo alguno resulta menor que la que en épocas pretéritas creó en aquéllos de nuestros colegas que nos precedieron en su estudio.