REVISTA DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS Exactas Físicas Químicas y Naturales DE ZARAGOZA

Serie 2.ª
Volumen 64

2009

ÍNDICE DE MATERIAS

Termodinámica Química: de los Fundamentos a la Aplicación
Ana Mª Mainar Fernández 7

Inestabilidad en el desarrollo y cambio global en plantas
Concepción L. Alados 35

Dos enfoques de la Ciencia: Sectorial y Sistémico
Mario Bunge 51

Vigencia y actualidad de la teoría de la evolución:
reflexiones en el bicentenario de Darwin
José Adolfo de Azcárraga 65

Generalized Hermite Fractal Interpolation
A. K. B. Chand and M. A. Navascués 107

ACTIVIDADES DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS, QUÍMICAS Y NATURALES DE ZARAGOZA EN EL AÑO 2006 121

Instrucciones a los autores 125

Intercambio de Publicaciones 127

Rev. Real Academia de Ciencias. Zaragoza. **64**: 7-33, (2009)

Termodinámica Química: de los Fundamentos a la Aplicación

Ana M.ª Mainar Fernández

Grupo de Termodinámica Aplicada y Superficies (GATHERS-I3A)

Departamento de Química Física, Facultad de Ciencias

Universidad de Zaragoza, 5009-Zaragoza

Premio a la Investigación de la Academia 2009. Sección de Químicas

Resumen

Este trabajo constituye un documento de revisión científica de algunas de las oportunidades que actualmente ofrecen los estudios experimentales y teóricos en el campo de la Termodinámica Química. A partir del legado científico recibido, eminentemente fundamental, se describe un viaje personal hacia la transferencia de conocimiento con la motivación adicional que supone el establecer sinergias con otras disciplinas. Este recorrido transcurre a través de las aportaciones que el estudio de los equilibrios de fases está realizando en campos tan diversos como la síntesis selectiva de productos orgánicos, los sistemas de refrigeración y la extracción y fraccionamiento de productos valiosos a partir de matrices sólidas. En todos los casos aquí analizados, los métodos experimentales y los modelos moleculares empleados resultarán claves para seleccionar y generar productos más limpios y seguros que poco a poco están permitiendo reescribir una Química desprovista de cualquier significado peyorativo.

1 Introducción

El Área de Química Física de la Universidad de Zaragoza, una gran desconocida para muchos, alberga una amplia trayectoria dedicada a la Termodinámica Química que se ha caracterizado por un trabajo tan concienzudo y meticuloso como discreto en sus manifestaciones. La determinación de las propiedades termofísicas de fluidos y mezclas, el estudio y la interpretación de cómo las interacciones intermoleculares son capaces de explicar el comportamiento macroscópico de los sistemas requieren un adiestramiento tan exigente en la medida y en la observación de los fenómenos experimentales que me traen a la memoria las palabras que un antiguo profesor dirigió a uno de sus discípulos en el laboratorio: –*¿No ves como resbalan las moléculas de terc-butanol por el vaso de precipitados?*–. Esta imagen, ya lejana en el tiempo, encierra el espíritu del químico-físico zaragozano, de sus objetivos básicos y del sacrificado oficio con el que se llenaron cientos de páginas de datos experimentales de equilibrio de fases y de propiedades termofísicas, siempre útiles para que terceros hiciesen uso de ellos.

Pero, ¿hay algo más allá de esas miles de horas detrás de un catetómetro o del arduo trabajo en la aplicación de los modelos teóricos? Más aún, ¿cuál es el papel

actual de la Química Física en España? Desafortunadamente no es el que tiene en otros países avanzados de nuestro entorno, ni el que le correspondería como rama fundamental de la Química que es. Esta situación, ganada a pulso en mi opinión, ha podido tener su origen en dos circunstancias: la primera debida a la propia naturaleza de la disciplina, constituida por ramas tan diferentes (Termodinámica Química, Electroquímica y Cinética) que han evolucionado, unas al margen de las otras, con desigual fortuna. Y la segunda, es la suma de esa dispersión interna y de su carácter fundamental que le han impedido, en gran medida, observar (lo que resulta sorprendente) las demandas de su entorno. De esta forma, la rigurosa e introvertida Química Física española no ha sabido satisfacer suficientemente las necesidades de químicos orgánicos, inorgánicos, analíticos, ingenieros, físicos o biólogos que han optado por auto-asistirse, en la mayoría de los casos con la pérdida del rigor propia de los no especialistas.

Sin embargo, como todas las áreas de conocimiento "frontera", la posición de la Química Física es inmejorable para destacar, junto con otras ciencias, en la asunción de nuevos desafíos, en la resolución de problemas y en definitiva en la transferencia de conocimiento. Pero para ello deberá ser capaz de identificar los campos de interés en los que existan demandas y eliminar los vacíos de comunicación existentes actualmente entre experimentalistas y teóricos. Una misión nada fácil pero tampoco imposible.

Teniendo en cuenta estas directrices, a lo largo de las siguientes páginas veremos como desde los fundamentos teóricos y prácticos de la Termodinámica Química puede abordarse el planteamiento de problemáticas tan diversas como interesantes y actuales, siempre con la motivación que supone el establecimiento de sinergias con otras disciplinas y áreas de conocimiento. En concreto se mostrará la importancia del disolvente y de las disoluciones en campos tan diversos como el de la selectividad y velocidad de reacciones orgánicas, el de la refrigeración por absorción y el de la obtención de productos valiosos a partir de matrices vegetales sólidas.

2 Las solubilidades de gases en líquidos a presión atmosférica: tras las huellas del agua.

El interés que los procesos de disolución han despertado en el hombre no es nuevo y ya fue evidenciado por los alquimistas en su búsqueda del disolvente universal, el *Alkahest* o *Menstruum Universale* según Paracelso. Aunque desde el establecimiento de las bases de la química moderna no se pretende encontrar ese *Menstruum Universale*, es cierto que una parte de los esfuerzos investigadores están dirigidos a esclarecer el papel que desempeña el medio en numerosos procesos.

El agua es el disolvente más común, sin duda por ser una de las sustancias naturales más difundidas y familiares y uno de los compuestos más notables de la naturaleza. Nuestro cuerpo contiene alrededor de un 70% en peso, aproximadamente, el mismo porcentaje de la superficie terrestre cubierta por océanos y mares. Sus singulares características físicas y químicas son las responsables no sólo de la evolución de la vida, sino del mantenimiento de un ambiente apropiado para el desarrollo de las especies del planeta: permanece en estado líquido en un intervalo de temperatura adecuado para los procesos vitales, es una de las pocas sustancias que al congelarse se expande, disminuyendo su densidad y haciendo posible la vida bajo la capa de hielo que se

forma. No obstante, no puede olvidarse que los disolventes no acuosos gozan también de un marcado protagonismo en química orgánica, bioquímica, metalurgia, electroquímica para, respectivamente, trabajos de síntesis, solubilización de proteínas (insulina, hemoglobina...), enzimas y vitaminas, obtención electrolítica de materiales (aluminio), funcionamiento y conservación de electrodos de litio o magnesio. Ante este panorama surgen inmediatamente las cuestiones sobre la relación que existe entre la estructura del disolvente y su comportamiento en el proceso de disolución o sobre lo que sucede a nivel macroscópico y microscópico.

Hasta ahora, la Ciencia no ha conseguido dar a esas cuestiones una respuesta de validez general, indudablemente por la complejidad intrínseca del estado líquido y por los múltiples factores que gobiernan el proceso de disolución. La labor a desarrollar en esos frentes es aún considerable y sigue siendo objeto de numerosos proyectos entre los cuales, aquellos que se refieren a procesos de aplicación industrial y de impacto ambiental cobran cada vez mayor relevancia.

Dentro de este engranaje que conforma lo que podríamos denominar la química de la disolución, las solubilidades de gases en líquidos constituyen una pieza muy destacada. Las bajas solubilidades que presentan algunos gases y la variedad en su tamaño y forma hacen que este campo de estudio sea un test inmejorable de teorías del estado líquido. Desde el punto de vista práctico, la solubilidad de gases resulta relevante no sólo en el estudio de procesos industriales, sino en ámbitos diferentes como la Medicina, Farmacia o Biología. Por ejemplo algunos procesos de intoxicación o anestesia son debidos a la perturbación que algunos gases y vapores de sustancias halogenadas (cloroformo, halotano...) disueltos en los líquidos corporales son capaces de producir en la permeabilidad iónica de las membranas. También pueden citarse la mejora de medios para el cultivo de microorganismos y los trabajos para la obtención de atmósferas artificiales en astronáutica y buceo.

Aparte de estos ejemplos clásicos, uno de los campos de aplicación de las solubilidades de gases en líquidos es el de la caracterización de los disolventes para su selección como medios idóneos en el desarrollo reacciones orgánicas de tipo asimétrico. El modelado empírico de algunas de las propiedades del disolvente es una de las herramientas más empleadas por la Química Orgánica para obtener información sobre la cinética de las reacciones.[1] En particular, la velocidad y la selectividad (endo/exo) en medio acuoso de algunas reacciones de cicloadición tipo Diels-Alder (Nobel de Química, 1950) están gobernadas por características del disolvente tales como el efecto solvófobo (*Sp*), su capacidad de establecer interacciones por puente de hidrógeno (HBD) y su polaridad-polarizabilidad.[2] En la bibliografía[3-6] aparecen numerosos estudios que atribuyen el aumento de la velocidad de estas reacciones al carácter solvófobo y a la capacidad HBD del medio acuoso en el que se desarrollan. Así mismo, se apunta que ese mismo efecto (*Sp*) parece ser el responsable del aumento de la selectividad endo/exo en algunos medios de reacción.[7-9]

En este sentido, alcoholes fluorados[10] como el 2,2,2-trifluoroetanol (TFE) o el 1,1,1,3,3,3-hexafluoroisopropoanol (HFIP) presentan características muy interesantes (elevado carácter ácido del protón del grupo hidroxílico debido al grupo $-CF_3$[11] y alta capacidad HBD,[12] entre otras) que les permiten tanto estabilizar radicales catiónicos en disolución[13-16] como modificar conformaciones de péptidos y proteínas.[17-20] Las mezclas acuosas en las que intervienen dichos alcoholes como cosolventes permiten

disolver los reactivos orgánicos a la vez que mantienen un grado de solvofobia y capacidad HBD suficientes para incrementar las velocidades de reacción y la estereoselectividad (endo/exo) en reacciones de cicloadición tipo Diels-Alder.[21] En particular, las mezclas agua+TFE son las que presentan una mayor capacidad solvófoba que aumenta a medida que la concentración de fluoroalcohol disminuye.

El término solvófobo (*horror al disolvente*) fue acuñado por A. Ben-Naim en 1971[22] como más general que el adjetivo hidrófobo (*horror al agua*) introducido por Frank y Evans en 1945.[23] De esta forma el efecto solvófobo (*Sp*) indica la insolubilidad relativa que presentan algunos solutos (orgánicos) en disolventes estructurados (agua, amidas, aminas, alcoholes) respecto a la solubilidad que muestran en disolventes de tipo orgánico de igual naturaleza. Debe tenerse en cuenta que este efecto se refiere exclusivamente a las interacciones soluto/disolvente.[24]

Una forma cuantitativa de determinar el efecto solvófobo de un disolvente fue propuesta por Abraham et al.[24] Este procedimiento se apoya en que la variación de la energía libre de Gibbs molar estándar de transferencia de solutos hidrófobos X (X = argón, helio, alcanos…) desde el agua (W) a otros disolventes (S) o mezclas presenta una dependencia lineal del tipo

$$\Delta G_t^o\ (X, W \rightarrow S) = M \cdot R_{\mathrm{T}} + D \qquad (1)$$

en la que *M*, *D* y R_{T} son parámetros característicos del soluto (R_{T}) y del disolvente (*M*, *D*). Tomando dos puntos fijos M = 0 para el agua y M = -4.2024 para el disolvente más hidrófobo (n-hexadecano) se define una escala de poder solvófobo (*Sp*)

$$Sp = 1 - \frac{M(\text{disolvente o mezcla})}{M(\text{n - hexadecano})} = 1 + \frac{M(\text{disolvente o mezcla})}{4.2024} \qquad (2)$$

en la que el agua es el disolvente con mayor poder solvófobo (o hidrófobo con *Sp* = 1) y el n-hexadecano el de menor (*Sp* = 0).

De esta manera teniendo en cuenta la ecuación (1), la forma experimental más adecuada de conocer el valor del parámetro *Sp* para un disolvente o mezcla es mediante la determinación de la solubilidad a presión atmosférica de varios gases (He, Ar, Kr, Xe, CH_4, C_2H_6…) en dicho disolvente y en agua haciendo uso de la relación:

$$\Delta G^{\mathrm{o}}_{\mathrm{sol,\,disolv}} = -\,\mathrm{RT}\ \ln x_{\mathrm{sol}}\ (\mathrm{sat.}) \qquad (3)$$

donde x_{sol} es la concentración de soluto (gas) disuelta en el disolvente (o mezcla) expresada como fracción molar en condiciones estándar (1 bar y 298.15 K). Las solubilidades de gases en agua a presión atmosférica en estas condiciones de trabajo han sido determinadas con muy buena precisión por diversos autores[25] y pueden encontrarse en la recopilación de Wilhelm.[26] Sin embargo solubilidades de gases en mezclas de interés como las señaladas (agua+fluoroalcohol) con la incertidumbre conveniente para la aplicación del método de Abraham, no suelen encontrarse en la literatura por lo que es necesario determinarlas experimentalmente con un dispositivo adecuado.

Se sabe que, atendiendo al método experimental utilizado en la determinación del gas disuelto, los métodos volumétricos a presión atmosférica son los más precisos. Estos aparatos en general, emplean sistemas de buretas y/o bulbos calibrados junto con dispositivos de control y medida de la presión. Los dispositivos, dependiendo de sus dimensiones, se sitúan dentro de un baño termostático de aire o agua. En general todos ellos son capaces de obtener precisiones de ±1% o mejores para presiones parciales de gas en torno a 1 atmósfera. Entre ellos puede citarse los aparatos de Morrison y Billett,[27,30-32] de Cook y Hanson,[33,34] de Ben-Naim y Baer[35] y los de Scholander[36] y Douglas.[37]

Recientemente, Clever y Battino,[38] en un capítulo dedicado a las solubilidades de gases en líquidos señalaron que de todos los dispositivos el más adecuado para medidas a presión atmosférica y que combina una buena incertidumbre con simplicidad es el de Ben-Naim y Baer. Nada sorprendente en las afirmaciones de estos autores para quien escribe, ya que un dispositivo inspirado en sus principios (Fig. 1) lleva funcionando desde 1979 en el Departamento de Química Física de nuestra Facultad proporcionando una incertidumbre inferior al 0.5%.[39]

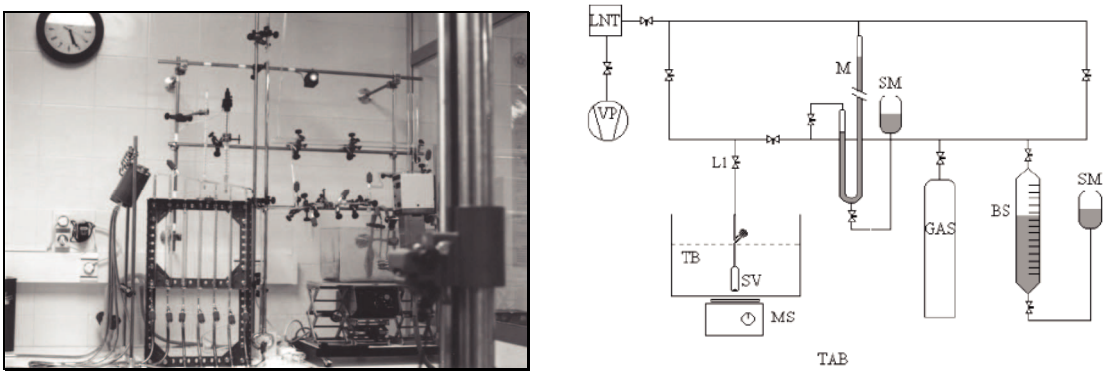

Figura 1.- Fotografía (izda.) y esquema (dcha.) del aparato de medida de solubilidades de gases en líquidos. Dpto. de Química Física. Facultad de Ciencias. VP, bomba de vacío; LNT, trap de nitrógeno líquido; TB, Baño termostático; SV, vasija de disolución; M, manómetro; MS, agitador magnético; BS, sistema de buretas; SM reservorio de mercurio; TAB, baño termostático de aire.

Con este dispositivo se determinaron las solubilidades de helio, argón y metano en mezclas acuosas de TFE[40] y HFIP a 298.15 K y fracciones aproximadas de fluoroalcohol (en la mezcla disolvente) de 0.04, 0.20 y 0.50. A partir de estos resultados experimentales se obtuvieron los efectos solvófobos (*Sp*) de estos medios constatándose su relación directa con un aumento de la velocidad de reacción y de la selectividad (endo/exo) de las reacciones de cicloadición Diels-Alders de ciclopentadieno + metil vinil cetona y de ciclopentadieno + (1R,2S,5R)-mentil acrilato.[21] Las correlaciones encontradas en el trabajo conjunto realizado en nuestra Facultad han sido destacadas por Reichardt en la tercera edición de su libro *"Solvents and Solvent Effects in Organic Chemistry"*.[1]

El estudio de solubilidades realizado en el Área de Química Física fue más allá con el sistema agua+TFE,[41,42] determinándose las solubilidades de 14 gases no polares (helio, neón, argón, kriptón, xenón, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, metano, etano, etileno, tetrafluoruro de carbono, hexafluoruro de azufre y dióxido de carbono) para fracciones molares de fluoroalcohol comprendidas entre 0.03 y 1. Durante los

experimentos se observó que las solubilidades de algunos gases presentaban un mínimo de solubilidad en la zona rica en agua ($x_{TFE} \approx 0.03$, Fig. 2).

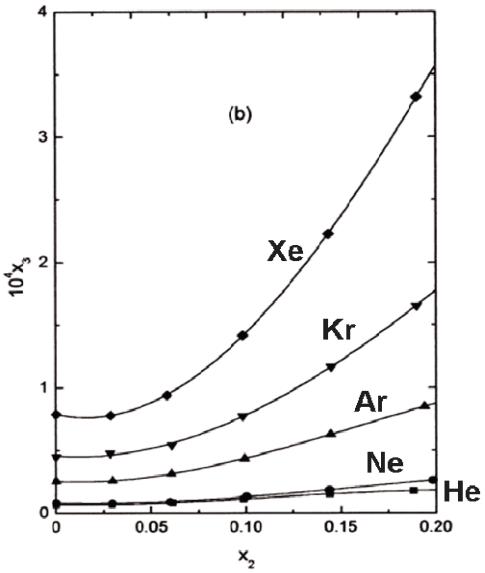

Figura 2.- Solubilidades de He, Ne, Ar, Kr y Xe en la mezcla H_2O (1) + TFE (2) a 298.15 K y 101.33 kPa de presión parcial de gas. Detalle de la zona rica en agua. Mainar *et al.*[42]

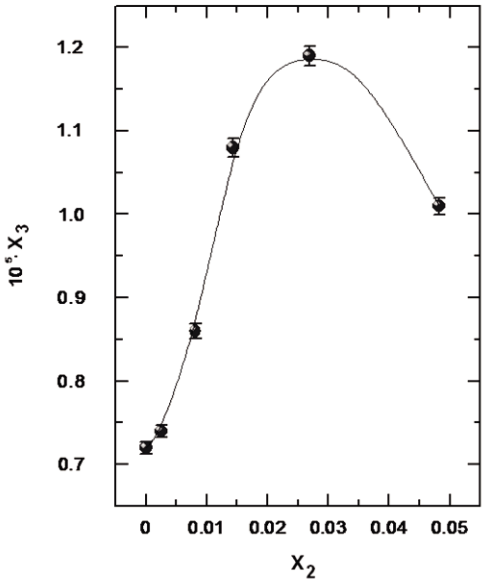

Figura 3.- Solubilidades de He en la mezcla H_2O (1) + TFE (2) a 283.15 K y 101.33 kPa de presión parcial de gas.[44,45]

Una vez descartados errores experimentales[43] y mejorado el dispositivo para reducir la incertidumbre en un factor de 5, se realizó una nueva evaluación de la solubilidad de helio en mezclas acuosas de TFE para fracciones molares comprendidas entre $0.0025 \leq x_{TFE} \leq 0.0500$.[44,45] Las medidas se efectuaron a 283.15 K para hacer más patentes los posibles fenómenos del proceso. Los resultados obtenidos (Fig. 3) muestran un máximo de la solubilidad para una fracción molar de TFE en torno a 0.03 que precede a un mínimo (la solubilidad de He en TFE es mucho mayor que en agua). Este comportamiento (disminución de la energía libre de Gibbs del proceso de solvatación) sugiere que las moléculas de TFE (y también las del gas) provocan una mayor reorganización en la estructura del agua. Estos efectos han sido constatados mediante el estudio volumétrico del sistema H_2O+TFE a distintas temperaturas.[44,45] En concreto, el volumen molar parcial de exceso de TFE en esa zona diluida presenta un mínimo (Fig.4) para esa misma fracción molar de fluoroalcohol indicativo de la compactación máxima de las moléculas de TFE.

Estos trabajos han suscitado el interés de químico-físicos teóricos de la Universidad de Rostock (Alemania) quienes nos solicitaron datos experimentales para corroborar algunas anomalías en la mezcla detectadas con sus modelos… Sin embargo una vez más la brecha entre teóricos y experimentalistas se hizo patente y se está a la espera de la oportuna colaboración. Este hecho me lleva a recordar con una sonrisa las palabras pronunciadas*, no sin cierto desdén, por un "preclaro" catedrático de Química Física de la Universidad de Salamanca: -*...hemos descubierto que en Zaragoza aún existen grupos de investigadores que están en la luna, aislados, dedicados a la Termodinámica…* -

* Prueba de habilitación, diciembre 2006.

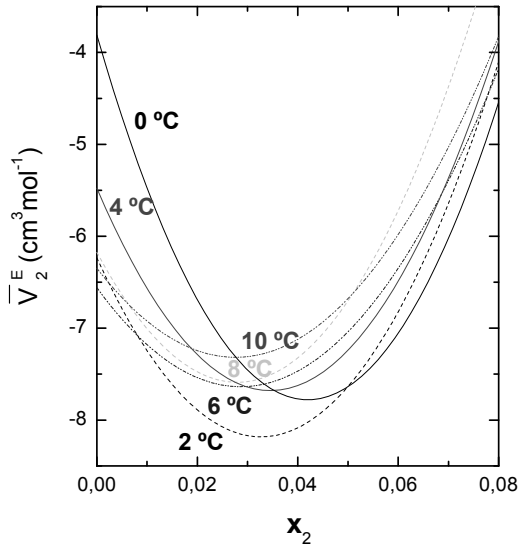

Figura 4.- Volúmenes molares parciales de exceso de 2,2,2-trifluoroetanol (2) a (0, 2, 4, 6, y 10) ºC en la mezcla H_2O (1) + TFE (2). López *et al.*[45]

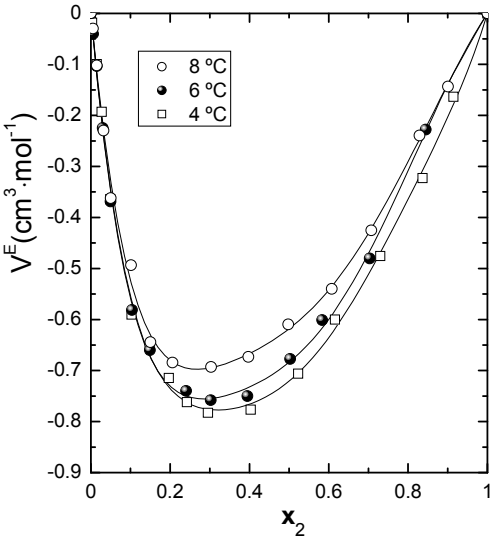

Figura 5.- Volúmenes de exceso del sistema agua (1) + 2,2,2-trifluoroetanol (2) a (4, 6 y 10) ºC. López *et al.*[45]

En el año 2005 Takamuku *et al.*[46] realizaron un estudio experimental de la estructura y dinámica del sistema H_2O+TFE mediante LAXS (Large-AngleX-ray Scattering) SANS (Small-Angle Neutron Scattering) y técnicas de relajación RMN. Hasta la fecha es el trabajo más completo sobre la estructura de este tipo de mezclas, sin embargo los efectos estructurales allí descritos están más cerca de proporcionar explicación al mínimo del volumen de exceso de la mezcla (Fig. 5, $0.2 \leq x_{TFE} \leq 0.25$) que a los resultados aquí presentados obtenidos mediante sencillas técnicas experimentales macroscópicas.

Pese a los avances de las técnicas y de los modelos teóricos todavía quedan por escribir bastantes páginas sobre el comportamiento de éstas y de otras mezclas de características similares, en las que la adición de un cosolvente es capaz de inducir comportamientos solvófobos útiles tanto para propósitos prácticos como teóricos.

3 Equilibrios de fase y sistemas de refrigeración: un bienestar sostenible

El incremento de la demanda energética que se viene produciendo desde el siglo pasado, ha conducido al planteamiento de políticas específicas a nivel mundial. Desde mediados de los años noventa uno de los objetivos principales de la política energética de la Comunidad Europea ha sido la integración de las consideraciones medioambientales con la seguridad en el abastecimiento y la competitividad industrial, configurando un panorama de desarrollo económico asentado en estos tres pilares fundamentales.[47,48]

La política energética española, consciente de su papel en el establecimiento de un desarrollo sostenible, ha compartido plenamente las directrices comunitarias estableciendo diversos Planes de Fomento de Energías Renovables y de Ahorro y Eficiencia Energética que han ido acompañados por una creciente (aunque nunca suficiente) apuesta por la investigación y el desarrollo tecnológico en esta materia. No podemos olvidar tampoco, el cumplimiento de los compromisos asumidos por nuestro país en el Protocolo de Kioto,[49] que proporciona un papel protagonista al sector de la energía, dada su elevada contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero (alrededor del 80% del total).

Así, en este entramado de directrices, que debieran suponer una revolución estructural,[†] las actividades investigadoras a corto, medio y largo plazo están dirigidas a cubrir una producción de energía limpia, principalmente renovable (considerando conceptos como integración, almacenamiento, distribución y uso), hacia el ahorro y la eficiencia energética (eco-edificios, poligeneración), hacia los combustibles alternativos y al desarrollo de nuevas fuentes de energías nuevas (pilas de combustible, tecnologías del hidrógeno, etc.) sin olvidar la eliminación, captura y retención del CO_2.

En este marco, las tecnologías de desarrollo de equipamientos de refrigeración son importantes, no solo desde el punto de vista industrial, sino por su creciente demanda en el sector terciario, fundamentalmente en países especialmente cálidos como el nuestro.

En los siguientes apartados presentaré las contribuciones, que desde el estudio de mezclas, hemos venido realizando en la última década a las tecnologías de refrigeración en colaboración con el Grupo de Ingeniería Térmica Aplicada (CREVER) de la Universitat Rovira i Virgili y con el Laboratorio de Propiedades Termofísicas de la Universidade de Santiago de Compostela. Sinergias entre la Ingeniería, la Física Aplicada y la Química Física que nos han permitido obtener una visión más amplia, germen para el planteamiento y resolución de nuevas problemáticas.

[†] Esperemos que las normativas y acuerdos no deriven solo en un intercambio de cupos y en gravámenes a los usuarios, ya anunciados "sorprendentemente" en el acto de clausura del 6.º Congreso Internacional de la ANQUE (Tenerife, 2006) por el entonces Secretario General para la Prevención de la Contaminación y el Cambio Climático (bajo la titularidad de Cristina Narbona en la cartera de Medio Ambiente) y actual Director de Relaciones Institucionales y Responsabilidad Corporativa de REPSOL. Debe tenerse en cuenta que los usuarios han sido avocados al consumo de productos que cuentan con todos los permisos pero que se emitieron y se siguen emitiendo desde fábrica con los defectos "medioambientales" conocidos. Como ejemplo, recuérdese el intento fallido del Gobierno de limitar la circulación de los todoterrenos al medio rural.

3.1 Lubricantes y aditivos para refrigerantes tipo HFC

Como consecuencia del descubrimiento de la degradación de la capa de ozono, y fruto de una cooperación internacional en materia de medio ambiente en 1987 (publicado en 1991) se estableció el Protocolo de Montreal.[50] En este acuerdo, que ya ha sido modificado en 5 ocasiones y enmendado en otras 4, se establecieron restricciones sobre el uso clorofluorocarburos (CFC's) o hidroclorofluorocarburos (HCFC's) en actividades de toda índole y productos de uso entre las que se mencionan de forma explícita los sistemas de refrigeración (refrigeradores con instalación de refrigeración, acondicionadores de aire e instalaciones, bombas de calor, etc.). Estas pautas hicieron iniciar la búsqueda de nuevos pares de trabajo refrigerante/lubricante que no difiriesen de los anteriores en prestaciones pero que fuesen benignos para la capa de ozono. De este modo, las investigaciones se enfocaron hacia la búsqueda de refrigerantes alternativos de tipo hidrofluorocarburo (HFC's) como el 1,1,1,2-tetrafluoroethano (HFC134a) e incluso de alcoholes como metanol y los ya mencionados TFE y HFIP. [51-54]

Como era de prever, la miscibilidad de estos nuevos refrigerantes en los lubricantes convencionales como aceites minerales, poli(α-olefinas), alquilbenceno, etc. resultó ser insuficiente, iniciándose una búsqueda de lubricantes alternativos y de aditivos para mejora de las mezclas de trabajo.[55,56] En este sentido desde el punto de vista experimental continuamos el trabajo iniciado por Tseregounis y Riley[57] sobre solubilidades de HFC134a en compuestos tipo poli(etilenglicol) dimetil éter $\{CH_3O\text{-}[(CH_2)_2O]_n - CH_3\}$. En particular, se examinaron las posibilidades del par de trabajo HFC134a/trietilenglicol dimetil éter (TrEGDME). Para ello se obtuvieron las solubilidades a presión atmosférica y a temperaturas comprendidas entre (258.15 y 298.15) K realizando una adaptación previa tanto del dispositivo experimental anteriormente descrito (Fig. 1) como del criterio seleccionado en el cálculo de la composición de las fases.[58] En la Universitat Rovira i Virgili se realizó un estudio de equilibrio líquido-vapor isotermo para temperaturas comprendidas entre (283.15 y 353.15) K.[59] Pudo comprobarse que ambos métodos de medida conducían a resultados plenamente concordantes.[58] De estos estudios se desprendieron varias conclusiones:

- El par de trabajo HFC134a/TrEGDME presenta, incluso a temperaturas bajas, características de solubilidad similares a las de sistema HFC134a/TEGDME[58] y adecuadas para ser utilizado en equipos de refrigeración ya que no aparecen zonas de miscibilidad parcial que dificultarían el buen funcionamiento de los equipos.
- Desde el punto de vista teórico, para la simulación de procesos de refrigeración por absorción, el modelo basado en coeficientes de actividad, NRTL (Non Random Two Liquids)[60] resulta adecuado en la correlación del equilibrio líquido-vapor. Sin embargo las predicciones calculadas mediante UNIFAC (tanto en su versión original[61] como Dortmund[62]), haciendo uso de los parámetros específicos de refrigerantes y lubricantes de Kleiber y Axmann[63] no dan buenos resultados. Recientemente Chaudari *et al.* [64] a partir de datos de equilibrio HFC134a/TrEGDME y HFC134a/MEGDME han realizado un nuevo cálculo de los parámetros específicos para los grupos "CF_3", "CH_2F","CH_3" y "CH_3O". No obstante, como ya había sido puesto de manifiesto desde nuestro laboratorio,[41,58] estos modelos de contribución de grupos basados exclusivamente en $\overline{G}_m^E$ no son los más idóneos para predecir resultados de sistemas para los no que existen datos previos y mucho

menos de poder ser empleados en la predicción del equilibrio en condiciones de presión distintas de las experimentales.

Para finalizar este apartado señalaremos el resultado de los estudios realizados con dialquil carbonatos y que apuntan a su idoneidad como aditivos para lubricantes.[65] Estos productos, debido a su carácter medioambientalmente benigno, han resultado ser altamente compatibles con el HFC134a (solubilidades muy próximas a las encontradas en TrEGDME y TEGDME). Además, en este trabajo se estableció una estrategia de selección previa a la experimentación para determinar la compatibilidad entre sustancias utilizando teorías de aplicación simple como la de la solución regular. En concreto nos referimos a la estimación del parámetro de solubilidad de Hildebrand y Scott[66,67] modificado posteriormente con la incorporación de una contribución debida a Hansen[68] para describir sustancias polares y asociadas. Según estos autores, el parámetro de solubilidad, δ_T, queda dividido en tres contribuciones: dispersiva, δ_D, polar, δ_P, y de puente de hidrógeno, δ_H

$$\delta_T^2 = \delta_D^2 + \delta_P^2 + \delta_H^2 \tag{4}$$

la determinación de estas tres contribuciones puede realizarse mediante el método de Martin and Hoy.[69]

Estos parámetros pueden visualizarse en un espacio tridimensional de forma que la distancia, D_{ij}, entre los valores correspondientes a soluto (i, refrigerante) y disolvente (j, lubricante) darán idea de su solubilidad mutua. Cuanto menor sea la distancia relativa, mayor su solubilidad.

$$D_{ij} = \left[\left(\delta_{D,i} - \delta_{D,j}\right)^2 + \left(\delta_{P,i} - \delta_{P,j}\right)^2 + \left(\delta_{H,i} - \delta_{H,j}\right)^2\right]^{1/2} \tag{5}$$

3.2 Mejora de los sistemas salinos tradicionales

Aunque los HFC's han constituido una de las primeras alternativas a CFC's y HCFC's ya que no destruyen la capa de ozono, tienen como principal inconveniente contribuir al efecto invernadero. Esto significa que desde la entrada en vigor del Protocolo de Kioto son sustancias cuya emisión debe reducirse por debajo de los niveles estipulados en los correspondientes acuerdos. Atendiendo a estos compromisos adquiridos, la actividad investigadora ha vuelto de nuevo su mirada hacia sistemas tradicionales de refrigeración como agua/LiBr y NH_3/agua que habían empezado a caer en desuso por inconvenientes como corrosión y mantenimiento de los dispositivos, toxicidad y complejidad en el manejo.

Para intentar resolver paliar los problemas del sistema agua/LiBr algunos autores sugirieron el empleo de aditivos como el ioduro de litio, el nitrato de litio y cloruro de litio para mejorar su solubilidad,[70] disminuir la presión de vapor[71] y minimizar los problemas de corrosión.[72] En 1999, Koo *et al.* [73] propusieron una proporción de sales optima (5:1:1:2, relación en moles) LiBr+LiI+$LiNO_3$+LiCl y determinaron algunas propiedades termofísicas,[74] sin embargo en un rango de trabajo insuficiente para diseñar y desarrollar un sistema de refrigeración por absorción.

En colaboración con el CREVER se determinaron, en primera instancia, las solubilidades, densidades y viscosidades de esta mezcla salina cuaternaria.[75,76] El estudio ha sido completado posteriormente por Salavera[77] con medidas de presiones de vapor y capacidades caloríficas. Cabe destacar el desarrollo (Servicio de Soplado de Vidrio, Universidad de Zaragoza), de una celda con doble camisa, Fig. 6, para la determinación de las solubilidades de las sales en agua por el método visual politérmico (VP) y la puesta a punto del correspondiente método experimental junto con otro basado en calorimetría diferencial de barrido (DSC) para los mismos fines.

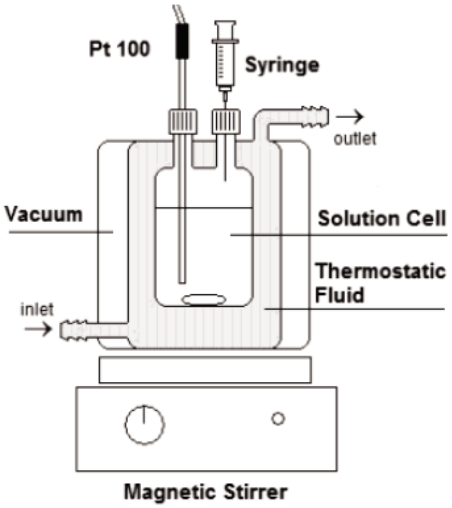

Figura 6.- Esquema de la celda de medida empleada en el método visual politérmico. Salavera *et al.*[76]

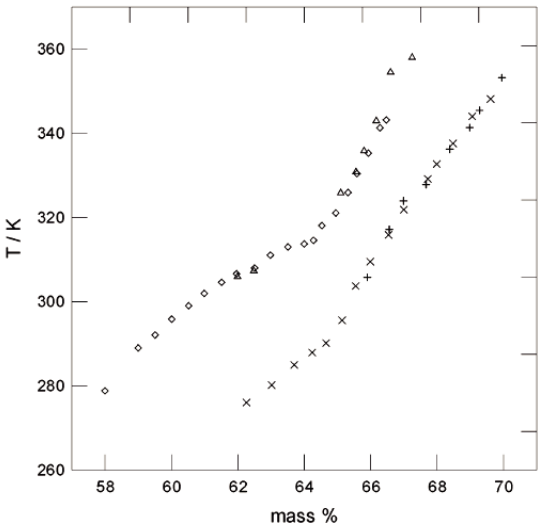

Figura 7.- Solubilidades de sistemas acuosos de bromuro de litio. H_2O+LiBr: □, VP; DSC, □. H_2O+LiBr+LiI+$LiNO_3$+LiCl (5:2:2:1): ×. VP; +, DSC. Salavera *et al.*[76]

Los resultados alcanzados por los dos procedimientos experimentales para el sistema cuaternario fueron coherentes (Fig. 7), si bien la precisión del método visual es mayor que la del calorimétrico; aunque potencialmente esta última técnica tendría más interés por la posibilidad de medir hasta 573 K. A modo comparativo y para verificar la idoneidad de los procedimientos experimentales se efectuaron también medidas de solubilidad del sistema agua/LiBr, constatándose la mayor solubilidad del sistema cuaternario. El estudio de propiedades termofísicas se completó en el CREVER con otro comparativo de simulación termodinámica de las dos mezclas salinas considerando ciclos de simple y doble efecto que concluyó con la caracterización experimental del proceso de absorción mediante un absorbedor tubular vertical enfriado por aire.[78] Los resultados obtenidos indicaron que la mezcla cuaternaria es la más adecuada para ser utilizada en sistemas de refrigeración por absorción cuya fuente de calor sea de baja temperatura.[79]

En lo relativo a los sistemas NH_3/agua, en los últimos años se han realizado estudios de caracterización termofísica de los sistemas NH_3/agua/NaOH, NH_3/agua/KOH[77] y NH_3/agua/$LiNO_3$.[80-82] Para el sistema NH_3/agua/NaOH se han realizado pruebas en planta piloto y se ha encontrado que la adición de hidróxido de sodio mejora el proceso de separación del amoníaco en el generador y que reduce tanto la temperatura de funcionamiento del refrigerador y las pérdidas por rectificación.[83] Según Steiu *et al.,*[84] las principales desventajas a la hora de implementar esta mezcla

ternaria son: a) la escasez de datos experimentales de propiedades termofísicas o de correlaciones/modelos eficaces para su obtención, b) la selección de sistemas adecuados para la separación del hidróxido sódico c) la evaluación de los problemas de corrosión potenciales. En éste último apartado nuestro grupo de investigación ha realizado estudios previos de corrosión para el sistema NH_3/agua/NaOH a temperatura ambiente empleando métodos electroquímicos suficientemente precisos como el de extrapolación de las rectas de Tafel y el de determinación de la resistencia de polarización. A 25 ºC, la velocidad de corrosión calculada para algunos metales férreos es de aproximadamente 0.2 mm/10 años. Estudios preliminares realizados en nuestro laboratorio con disoluciones alcalinas sobre otros metales a temperaturas similares a las que se alcanzan en el generador (90ºC) indican que la velocidad de corrosión podría verse incrementada unas diez veces.[84]

Por último hay que señalar la existencia en la bibliografía trabajos de simulación como el de Venegas *et al.*[85] en el que se valora la incorporación sistemas de absorción por pulverización para disoluciones $NH_3/LiNO_3$ que permitan reducir el tamaño de los equipos de absorción para aplicaciones domésticas.

3.3 CO_2 como refrigerante en sistemas de compresión

Aunque la tecnología de los equipos de refrigeración por absorción presenta ventajas como menores requerimientos de potencia eléctrica, utilización de calor residual, funcionamiento más flexible y fiable, en muchas ocasiones los equipos de compresión mecánica de vapor tienen una mayor demanda debido fundamentalmente a su eficiencia, menor tamaño y precio competitivo.[86,87] En las últimas décadas, ha vuelto a reconsiderarse el uso de CO_2 como refrigerante para este tipo de equipamientos de compresión[88-90], sobre todo en máquinas de tamaño medio y pequeño.[90] Al igual que sucedía en los sistemas HFC+lubricante, el refrigerante entra en contacto directo con el lubricante del compresor, de forma que su solubilidad mutua y la variación de la viscosidad del lubricante al mezclarse con el refrigerante resultan los principales problemas a resolver en la identificación y formulación de lubricantes adecuados. Esta mezcla puede conllevar una inadecuada acumulación de lubricante en distintas partes del circuito como el evaporador, el condensador, el dispositivo de expansión y las tuberías.[87] El resultado de la mezcla supone la aparición de una película de aceite que recubre las paredes interiores del dispositivo y de cuyo grosor depende la transferencia de calor.[91] A menor solubilidad del refrigerante en el lubricante, mayor viscosidad y tensión superficial de la película, mayor grosor de la misma y peor transferencia de calor.[92] El CO_2 no presenta una solubilidad adecuada en la mayoría de los lubricantes comunes, y aunque han sido identificadas algunas familias de compuestos idóneas[90] (polialquilenglicoles, poliol ésteres o alquilbencenos) todavía nos encontramos lejos de poder indicar cual de los compuestos es el óptimo para el CO_2, cuáles son las mejores condiciones de trabajo de las mezclas y cuáles son sus límites de miscibilidad.

Esta es una de las líneas de investigación que se están desarrollando en el laboratorio de propiedades termofísicas de la Universidade de Santiago de Compostela con el que establecimos una colaboración para diseñar y montar un dispositivo experimental que permitiese acometer los estudios de solubilidad en condiciones de presión similares a las de las máquinas de refrigeración.[93]

Para trabajar a presiones de hasta 10 MPa se seleccionó un dispositivo de medida isocoro, similar a otros descritos en la literatura,[94-96] y que pese a proporcionar mayores incertidumbres que el presentado anteriormente (±5% *vs* ±0.5%), Fig. 1, resulta mucho más adecuado por su sencillez de manejo a presión (Fig. 8).

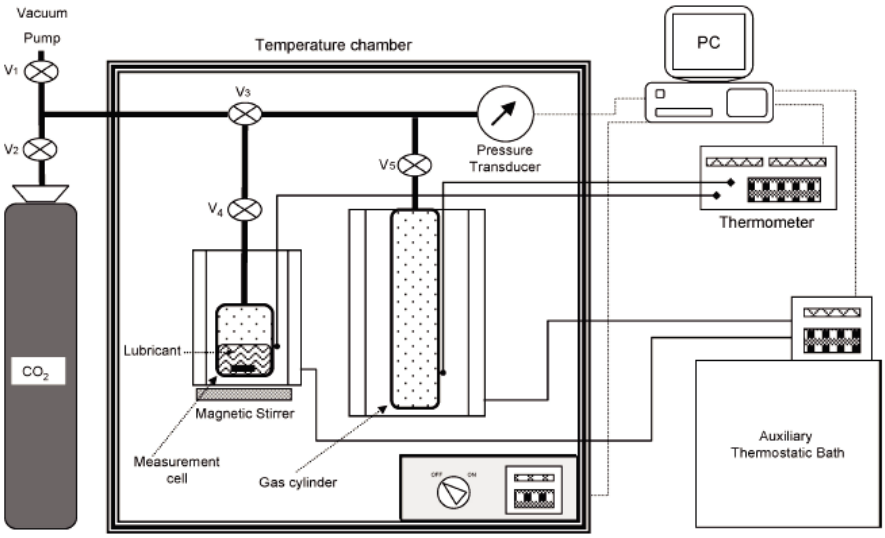

Figura 8.- Esquema del dispositivo de solubilidades. Fandiño *et al.*[93]

Con este dispositivo se determinó la solubilidad de dióxido de carbono en dos pentaeritritol ésteres (PEs), en concreto se midió su solubilidad en pentaeritritol tetrapentanoato (PEC5) y en pentaeritritol tetra(2-etilhexanoato) (PEBE8) en un rango de temperaturas de (283.15 a 333.15) K y hasta presiones de 7 MPa. Las diferencias máximas encontradas para el sistema CO_2+PEC5 respecto a datos disponibles en la literatura[97] fueron del 3.6%, dentro del error experimental de los dispositivos de medida empleados.

Los sistemas estudiados muestran una desviación negativa respecto de la ley de Raoult evidenciando la presencia de fuertes interacciones en la mezcla entre moléculas de refrigerante y lubricante. Este comportamiento justifica la elevada solubilidad de CO_2 que aumenta con la presión y disminuye con la temperatura como es más usual en las disoluciones de gases en líquidos.

Desde el punto de vista teórico, teniendo en cuenta lo indicado en el apartado *3.1* relativo a la no idoneidad de modelos basados en $\overline{G}_m^E$, se utilizó el convenio ϕ-ϕ para describir el comportamiento del equilibrio de fases. Los coeficientes de fugacidad se obtuvieron a partir de la ecuación de estado cúbica de Soave-Redlich-Kwong (SRK) y los parámetros correspondientes a la mezcla (k_{ij} y l_{ij}) se ajustaron a partir de los datos experimentales utilizando una regla de mezcla cuadrática. Las desviaciones promedio máximas encontradas entre valores experimentales y teóricos para los sistemas CO_2+PEC5 y +PEBE8 fueron de 0.7% y 1.5% respectivamente. Con esta ecuación de estado y los valores de los parámetros de "interacción" se han podido predecir equilibrios líquido-líquido y líquido-líquido-vapor para ambos sistemas a temperaturas comprendidas entre 298.15 K y 313.15 K y a fracciones molares de dióxido de carbono superiores a 0.9. Los resultados alcanzados muestran la idoneidad del modelo SRK y el de la regla de mezcla clásica para la correlación de la solubilidad de estos pares refrigerante/lubricante.

Los estudios teórico-experimentales realizados ponen de manifiesto que estos sistemas son potencialmente utilizables de forma ventajosa en lo referente a la miscibilidad mutua de los componentes en las mezclas. Sin embargo, una solubilidad tan elevada podría limitar su aplicación debido a la drástica reducción de la viscosidad que podría producir pérdidas de lubricación del compresor. Teniendo en cuenta las predicciones arrojadas por el modelo aplicado, el diseño del modo de operación del dispositivo de refrigeración debería considerar la posibilidad de aparición de miscibilidad parcial a concentraciones elevadas de refrigerante y temperaturas moderadas.

4 El CO_2 como disolvente alternativo: un guiño a los productos naturales

Como ya se ha mencionado en el apartado anterior, una de las direcciones en las que el sector energético debe redoblar esfuerzos de investigación es en la eliminación, captura y retención del dióxido de carbono (CO_2). El CO_2 es uno de los gases causantes del efecto invernadero y también el más conocido y difundido por los medios de comunicación.[‡] Actualmente se está estudiando la posibilidad de mineralizar este gas para convertirlo en carbonatos minerales o policarbonatos orgánicos aunque los requerimientos energéticos son altos y la velocidad de transformación lenta. En los últimos años también está cobrando fuerza la idea de almacenarlo en las bolsas exhaustas de gas natural, pero no existe una seguridad absoluta sobre la estanqueidad de estos geo-contenedores.[98] Eventuales fugas hacia acuíferos producirían una acidificación y redisolución de metales pesados no deseables a la que muchos organismos son sensibles.[§]

Una de las alternativas al almacenamiento de dióxido de carbono es la de potenciar su uso en dispositivos industriales y/o comerciales para un amplio rango de aplicaciones. En el apartado §3.3 se revisaron algunas de las aportaciones más recientes para mejorar sus prestaciones como refrigerante en equipos de compresión y en este epígrafe se tratará su empleo en condiciones supercríticas como disolvente alternativo a los compuestos orgánicos convencionales.

Desde el arranque de la utilización industrial de los fluidos supercríticos en la década de los 70 del siglo pasado, sus aplicaciones en diversos campos tanto de química básica como de tecnologías químicas no han hecho sino aumentar a la par que el interés de los investigadores debido a que sus posibilidades todavía están poco explotadas. Si bien se ha trabajado con diferentes sustancias en estado supercrítico, cabe decir que el compuesto más utilizado con diferencia es el CO_2 debido a sus características favorables: es inerte, inocuo, barato y fácilmente reciclable. El CO_2 cumple muchos de los requisitos para ser considerado un disolvente sostenible (″verde″) por ser, en la

[‡] Sin duda existen intereses político-económicos en torno al dióxido de carbono ya que su generación no es exclusiva del sector de producción de energía sino que involucra a todos los usuarios de vehículos de combustión. Por el contrario, poco o casi nada trasciende de otros gases de efecto invernadero como los óxidos de nitrógeno, NO_x, generados en los procesos de combustión a alta temperatura como los que por ejemplo, se producen en todos los vuelos comerciales y que se "inyectan" directamente en la parte alta de la troposfera. Obviamente, intervenciones políticas en este sentido afectarían indirectamente al flujo de capital hacia otros sectores así como al propio sistema consumista en el que vivimos.

[§] Antes de proceder a invertir las chimeneas de las fábricas, deberían adoptarse otras medidas como la disminución drástica de las emisiones en el sector del transporte junto con una reforestación adecuada que permita cerrar el ciclo del CO_2.

mayor parte, un subproducto de las plantas de síntesis de amoniaco.[99] Recientemente, Beckman[100] ha enumerado nada menos que trece áreas de interés de aplicación del CO_2 supercrítico en la investigación futura acerca de procesos sostenibles.

Una de las áreas más caracterizadas es la de la extracción con fluidos supercríticos (SFE)[101,102] hasta tal punto que entre 1994 y 2003 pueden encontrarse en la bibliografía nada menos que 3678 referencias.[103] Entre la gran variedad de sistemas a los que se ha aplicado la extracción con CO_2 supercrítico ocupa un lugar destacado el material vegetal (plantas arbustivas, aromáticas y especies arbóreas entre otras) con el objeto de obtener los denominados aceites volátiles, que son de gran utilidad en industrias como la cosmética, la alimentaria o la farmacéutica. En el último año, el número de artículos dedicados a extracción supercrítica de estos productos se ha incrementado en un 30% respecto a los publicados en 2005.[104]

La extracción con CO_2 supercrítico, ya sea con o sin la adición de modificadores[**] es una alternativa con futuro para la extracción de productos naturales (frente a la clásica hidrodestilación o el uso de disolventes orgánicos) debido a que permite trabajar a temperaturas no muy elevadas, siendo por ello, menos agresiva con las sustancias termolábiles (Fig. 9). Así mismo, la técnica permite modular con precisión la capacidad solvente del CO_2 manipulando las condiciones de presión y temperatura con el fin de enriquecer el extracto en los componentes de interés. Una vez disuelto el soluto, basta una variación en las condiciones de presión y temperatura para que soluto y disolvente se separen eficazmente, e incluso éste último puede ser reutilizado posteriormente. Es posible realizar varios fraccionamientos empleando diversos colectores que operen en distintas condiciones de trabajo. Debido a la distinta naturaleza del dióxido de carbono y de los solutos a extraer, la separación es relativamente sencilla y no deja en los extractos ningún tipo de residuo perjudicial.

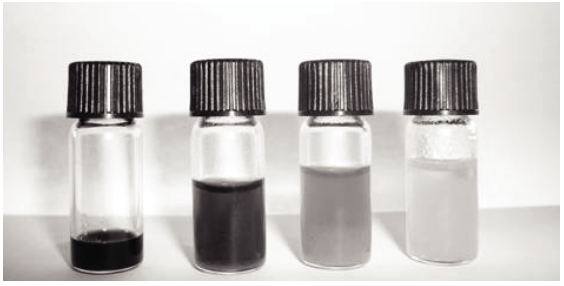

Figura 9.- Fracciones de ajenjo obtenidas en el Área de Química Física (de izda. a dcha.): hidrodestilado, Soxhlet-etanol, Soxhlet-hexano y extracto supercrítico. Puede apreciarse el tono oscuro del extracto hidrodestilado (azul en realidad) debido a la presencia, confirmada por GC-Masas, de camazuleno, un producto procedente de la degradación térmica.

En este marco de aplicación cabría destacar el diseño, montaje y puesta a punto de la primera planta piloto (1L de capacidad, Fig. 10) de nuestra Comunidad Autónoma para extracción con CO_2 supercrítico que desarrollamos en colaboración con el Departamento de Ingeniería Química del Instituto Superior Técnico de Lisboa. En ella venimos trabajando con materiales de cultivo controlado procedentes del Centro de

[**] Los modificadores son sustancias de carácter polar que mejoran la capacidad de solvatación del dióxido de carbono permitiendo arrastrar los componentes más polares de la matriz. En general suelen emplearse alcoholes, preferentemente etanol en proporciones inferiores al 10% en volumen.

Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA) y del Centro de Ciencias Medioambientales del CSIC (Madrid).

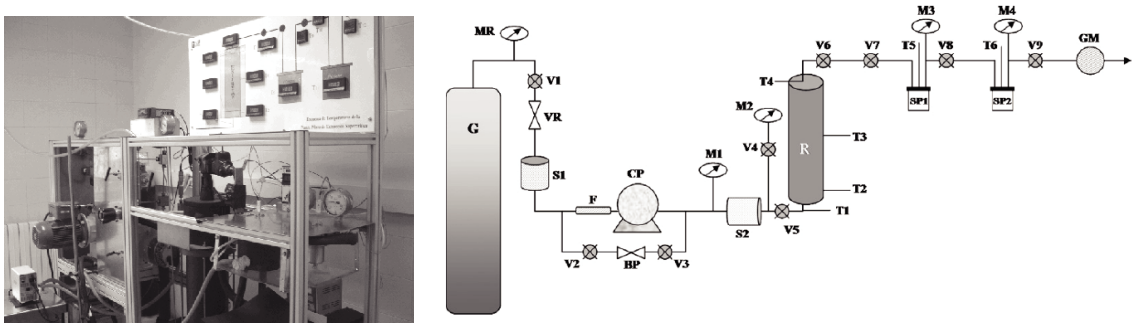

Figura 10.- Planta piloto de extracción con CO_2 supercrítico. Langa *et al.*[105]

Los estudios iniciales realizados se enfocaron a la caracterización y optimización del proceso de extracción de dos plantas aromático-medicinales: *Hyssopus officinalis* L.[106,105] y *Salvia lavandulifolia* Vahl.[106,107] El hisopo es una planta con un amplio espectro de aplicaciones farmacológicas bien reconocidas (antirreumático, antiespasmódico, expectorante, etc.) y recientemente se ha descrito actividad antifúngica asociada a algunos de sus componentes principales (terpinen-4-ol y 1,8-cineol).[108] Por su parte, la salvia contiene monoterpenoides reconocidos en el tratamiento del Alzheimer como inhibidores de la colinesterasa.[109,110]

Para ambas especies, las condiciones óptimas de extracción fueron de 90 bar, 40 ºC, 1.32 kg/h de caudal de CO_2 y 0.8 mm de diámetro de tamaño de partícula. El componente mayoritario en el aceite de hisopo fue el 1,8-cineol (o eucaliptol, 60-75%) y en el aceite de salvia el alcanfor (40%). En la Fig. 11 aparecen las imágenes SEM del tejido glandular de las dos especies que alberga la mayor parte de los componentes volátiles.

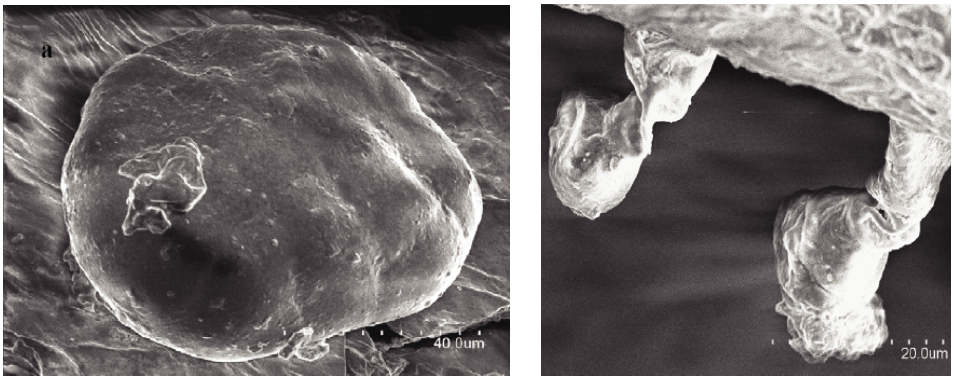

Figura 11.- Imágenes obtenidas con un microscopio de barrido electrónico (SEM) de los tricomas de hisopo (izda.) y de salvia (dcha). Langa *et al.*[105,107]

El proceso de extracción, aunque complejo, fue descrito satisfactoriamente por el modelo desarrollado por Sovová[111] basado en las siguientes ecuaciones de transferencia de materia:

$$uV\frac{\partial c}{\partial h}+\varepsilon V\frac{\partial c}{\partial t}+(1-\varepsilon)V\frac{\partial q}{\partial t}=0 \qquad (6)$$

$$(1-\varepsilon)V\frac{\partial q}{\partial t} = -A_p K(q - q^*) \qquad (7)$$

donde ε es la porosidad del lecho, V el volumen del extractor (m^3); c la concentración del extracto en la fase fluida ($kg \cdot m^{-3}$), q la concentración del extracto en la fase sólida ($kg \cdot m^{-3}$), u la velocidad superficial del disolvente ($m \cdot s^{-1}$), A_p la superficie total de partícula (m^2), q^* la concentración en la interfase sólido-fluido que se asume en equilibrio con la fase fluida ($kg \cdot m^{-3}$), h la coordenada espacial a lo largo del lecho (m), t el tiempo de extracción(s), q_0 la concentración inicial en la fase sólida ($kg \cdot m^{-3}$) y K ($m \cdot s^{-1}$) el coeficiente interno de transferencia de masa.

De forma muy resumida, la hipótesis del modelo considera que el material a extraer (soluto = aceites volátiles, en el caso que nos ocupa) se encuentra alojado en estructuras esféricas constituidas en su parte externa por celdas rotas y en la interna (núcleo) por celdas intactas. Además, también se considera un reparto homogéno del soluto en la matriz sólida que lo contiene. Siguiendo a la propia autora, el soluto ubicado en las celdas externas (rotas) es fácilmente accesible y se transfiere directamente a la fase fluida del disolvente, mientras que el soluto ubicado en las celdas internas debe transferirse primero a las celdas rotas y posteriormente a la fase fluida lo que, al igual que sucede en los experimentos, permite distinguir dos zonas diferenciadas en las curvas de extracción: la primera (más rápida) gobernada por fenómenos de solubilidad y la segunda (más lenta) por fenómenos de difusión.

Para hacer más versátil el modelo, Sovová ha proporcionado soluciones matemáticas a los distintos balances planteados teniendo en cuenta el tipo de flujo y de matriz vegetal empleado. En la Figura 12, se muestra la influencia de la presión y la temperatura en la extracción de aceites volátiles de salvia con CO_2 supercrítico junto con las correlaciones del modelo de Sovová. En dicha figura pueden apreciarse claramente las dos regiones características indicadas (distinta pendiente) que son específicas para este tipo de operaciones de extracción con fluidos supercríticos.

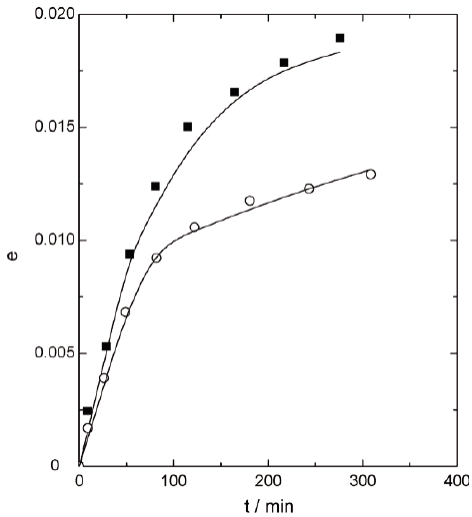

Figura 12.- Influencia de la presión de CO_2 y de la temperatura en la extracción de aceites volátiles de salvia: e (rendimiento) *vs* t (minutos). 90 bar-40ºC-1,32 kg/h-0.8 mm, ■; 100 bar-50ºC-1,32 kg/h-0.8 mm, ○; ─ Modelo de Sovová. Langa *et al.* [107]

En los últimos cuatro años la actividad más novedosa que hemos venido desarrollando en el campo de la extracción supercrítica se ha centrado en dos grandes áreas de interés que se encuentran plenamente integradas en la sostenibilidad medioambiental y económica: *bioplaguicidas naturales* y *recuperación de materiales valiosos de residuos*.

La vuelta a la naturaleza como fuente de nuevos compuestos para la protección de cultivos o para la revalorización de residuos ha venido condicionada tanto por los graves problemas originados por los insecticidas sintéticos[††] como por la necesidad de generar alternativas económicas y sostenibles mediante un mejor aprovechamiento de los recursos vegetales y agronómicos.[‡‡]

Los plaguicidas botánicos se incluyen en la definición de semioquímicos dada por la Organización para el Desarrollo y la Cooperación Económica (OECD) como: "*Compuestos químicos emitidos por plantas, animales u otros organismos –y análogos sintéticos– que inducen una respuesta fisiológica o de comportamiento en individuos de la misma o de diferente especie*". Un informe del Mercado Europeo de Bioplaguicidas[112] revela que su tasa de crecimiento anual es actualmente del 10,1%, con tendencia a aumentar y que en el mercado Europeo representa el 45% de la demanda de estos productos. Las cifras presentadas junto con restricciones aplicadas recientemente por la UE a los plaguicidas de síntesis dan cuenta de todo un nicho de mercado pendiente de explotar.[§§]

Además del sector de los plaguicidas botánicos, la recuperación de productos valiosos a partir de residuos agrícolas puede suponer una revitalización del entorno vitivinícola (en Aragón se producen 32.000 Tm/año de orujos, datos de la campaña 2007) y de la producción de biomasa con fines energéticos. Todas estas demandas socio-económicas implican el desarrollo de nuevos productos mediante la investigación sistemática de plantas, de hongos y de residuos agrícolas. Los extractos obtenidos deberán ser sometidos a ensayos de actividad para pasar posteriormente al aislamiento e identificación de las moléculas activas. Se deberán optimizar métodos de cultivo eficaz de aquellas plantas que presenten una actividad de interés y para obtener los productos finales será necesario aplicar métodos de extracción ambientalmente seguros.

Así, en colaboración con el CCMM-CSIC y el CITA, estamos realizando estudios sobre especies como *Artemisia absinthium* L., *Lavandula luisieri* L, *Senecio*

[††] Como la contaminación ambiental, persistencia de residuos en alimentos y aguas y el desarrollo de resistencias en los organismos plaga.

[‡‡] Desmantelamiento de alcoholeras por baja rentabilidad del producto obtenido a partir de los restos orgánicos del proceso de vinificación.

[§§] El mercado principal de los bioplaguicidas lo constituyen la agricultura ecológica, los cultivos bajo plástico, parques y jardines. La agricultura ecológica tiene una gran demanda de bioplaguicidas ya que sus productores no pueden usar los agroquímicos convencionales. Al mismo tiempo, este sector se encuentra en clara expansión debido al requerimiento creciente de alimentos sanos por parte de los consumidores y por los ya mencionados problemas de contaminación ambiental derivados del uso de plaguicidas sintéticos. Con una media de crecimiento anual del 30%, la agricultura ecológica en la EU constituye uno de los mercados más dinámicos del sector agrícola. Desde la puesta en vigor de una legislación comunitaria que regula la producción ecológica (Council Regulation No 2092/91/EEC del 24 de Junio 1991) aumenta cada día el número de agricultores que se acogen a ella. Para lograr una producción agrícola sostenible en Europa (uno de los principales objetivos de la "Common Agricultural Policy", CAP) se requieren medidas "limpias" de control de plagas y enfermedades.

Palmensis, *Persea indica*, entre otros, como fuente natural de bioplaguicidas que recientemente han desembocado en la solicitud de una patente europea.

En cuanto a la revalorización de residuos, dentro de una de las líneas prioritarias del Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), se está trabajando en colaboración con el profesor J. A. Cacho en la recuperación, mediante extracción con CO_2 supercrítico de resveratrol, tocoferoles (vitamina E) y ácidos grasos (Omega 6 y 9) a partir de pepitas y hollejos de uva procedentes del proceso de vinificación. Los primeros resultados muestran, Fig. 13, un elevado contenido de Omega 6 en los residuos estudiados y una elevada capacidad antioxidante.[***]

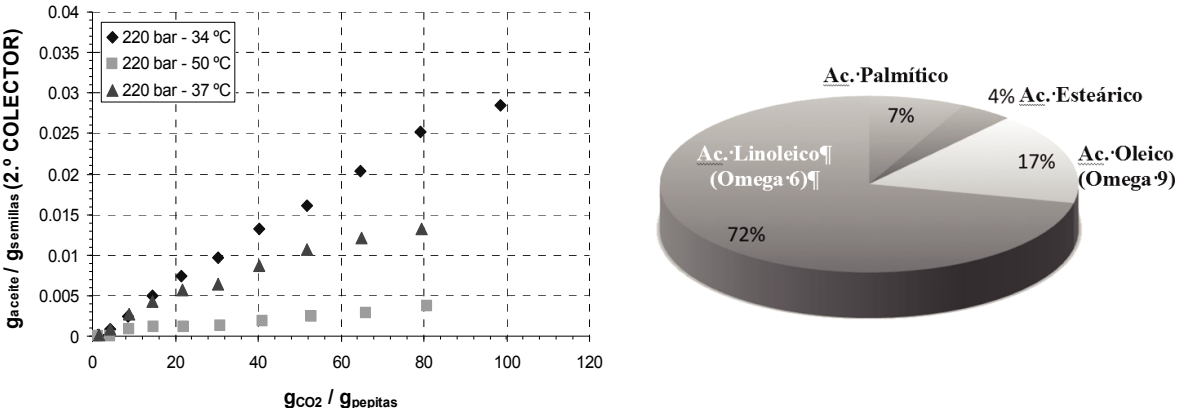

Figura 13.- Evolución de la curva de extracción del aceite de pepitas de uva con CO_2 supercrítico (izda.) y composición media obtenida en ácidos grasos (dcha.).

Otra línea de reciente inicio, en colaboración con el CITA y el CCMA-CSIC, está dedicada a la revalorización y conservación de especies arbóreas autóctonas como el chopo negro (*Populus nigra* L.). En los estudios previos[113-116] se ha conseguido concentrar mediante extracción supercrítica un derivado de las chalconas con capacidades bacterióstaticas bien descritas y que es el componente mayoritario de las yemas de la especie autóctona frente a la composición de las yemas de otros clones de uso más extendido en la ribera del Ebro. Confiamos en que esta línea de trabajo, pueda conjugarse en el futuro con el reciente interés que, desde el punto de vista energético, están adquiriendo las especies de chopo de crecimiento rápido para la obtención de biomasa.[117] Conseguir aunar estas dos perspectivas permitiría dar un mayor valor y aprovechamiento del chopo dentro de una filosofía de trabajo que entronca directamente con el actual concepto de bio-refinería.

Y en todas estas aplicaciones, ¿dónde se encuentra la Termodinámica química? Oculta tras cada extracción, discreta, sin hacer alardes pero anticipándose y dando respuestas y soluciones cuando los procesos no funcionan como se había pensado… En el fondo la termodinámica es el ingrediente "secreto" de una buena receta que los químico-físicos teórico-experimentalistas debemos aprender a cultivar y conservar.

[***] EC_{50} = 0.15 g extracto pepitas/ g DPPH *vs* EC_{50} = 0.18 g Trolox/ g DPPH. El Trolox es una vitamina E sintética e hidrosoluble que se emplea como referencia para las determinaciones de capacidad antioxidante. El EC_{50} es la cantidad de antioxidante que ha de añadirse a una disolución de radical DPPH para conseguir reducir concentración del radical a la mitad de la inicial. El DPPH es un radical hidrosoluble estable que presenta un máximo de absorbancia a unos 517 nm de longitud de onda.

Para la optimización de cualquier proceso, y los que involucran a fluidos a presión o en condiciones supercríticas no son la excepción (extracción, reacciones, micronización, tratamiento de materiales, etc.) resulta primordial conocer los fenómenos que se producen en el interior de los dispositivos. A este respecto, el estudio teórico-experimental del equilibrio de fases y de las propiedades termofísicas a temperaturas y presiones elevadas, a ser posible en torno del punto crítico, es fundamental.

La adquisición del conocimiento necesario sobre procesos en los que se trabaja con fluidos supercríticos o a presión debe abordarse, según mi opinión, a distintos niveles. El primero, constituye el nivel básico imprescindible (operativo) que permitirá establecer las variables de estado óptimas para que las fases presentes en cada momento sean las adecuadas para obtener una buena disolución, o una separación o una reacción. Esta fase previa vendrá marcada por la elección de modelos que sean capaces de proporcionar una imagen lo más fiel posible del comportamiento de fases de nuestro sistema. Por ejemplo, en el campo de las reacciones en fluidos supercríticos resulta conveniente que la reacción se lleve a cabo en fase homogénea, mientras que la separación de productos y reactivos mejora considerablemente si se produce en fase heterogénea. En el caso de la extracción la aparición de dobles fases durante el proceso de disolución de los solutos resulta inconveniente, mientras que durante el fraccionamiento se busca una separación de fases lo más selectiva posible para lo que es aconsejable conocer la solubilidad de soluto y disolvente. Los modelos más adecuados en la correlación de datos a presión suelen ser ecuaciones de estado (EoS) de tipo cúbico como Soave-Redlich-Kwong y Peng-Robinson combinadas con reglas de mezcla clásicas como van der Waals (1 o 2 parámetros) o Wong-Sandler. Para sistemas que contengan un fluido supercrítico o para los que no se conozcan los parámetros de interacción soluto-disolvente la EoS de tres parámetros de Patel-Teja-Valderrama es una de las más idóneas. Si los sistemas en estudio contienen moléculas complejas (polímeros, moléculas asociadas) las ecuaciones basadas en teoría de perturbaciones (SAFT y PC-SFAT) son las más recomendables, incluso desde el punto de vista predictivo.

La utilización de estos modelos implica disponer de datos experimentales tanto volumétricos como de equilibrio de los componentes del sistema en condiciones tan próximas a las del proceso como sea posible. Si la disponibilidad de equipamientos de equilibrio a presión es limitada o nula puede recurrirse a la determinación de medidas a presión atmosférica y seleccionar modelos de correlación/predicción basados en la función de Helmholtz, en lugar de en la Energía libre de Gibbs, que nos permitan extrapolar a presiones elevadas con la garantía suficiente.

El siguiente nivel de modelización en procesos de extracción es el que intenta reproducir la solubilidad o el rendimiento y la composición del extracto en función de parámetros como el fluido empleado, la temperatura, la presión y velocidad de flujo del fluido del proceso, el tiempo de extracción, el tratamiento previo del sustrato, etc. Entre ellos se encuentran los modelos de Sovová, Reverchón, y Reis-Vasco que están siendo aplicados para la extracción supercrítica de matrices sólidas de distinta naturaleza.

Más allá, se sitúa el conocimiento fundamental a nivel microscópico de lo que sucede estos sistemas. Así, para establecer las propiedades de solvatación de un fluido supercrítico sería de gran interés conocer si la distribución de solventes supercríticos es

relativamente homogénea o si hay algún tipo de agregación de moléculas de solvente alrededor del soluto. Las mezclas de fluidos presentan heterogeneidades en su estructura y composición a nivel microscópico que hay que tener en cuenta para realizar estudios teóricos. La simulación computacional basada en partículas es una herramienta ideal para abordar esta problemática. Para ello es necesaria la utilización de métodos de Monte Carlo mediante los cuales simular el comportamiento crítico de fluidos complejos y obtener predicciones realistas acerca de propiedades que no son accesibles experimentalmente.[118] En los últimos años esta metodología ha sido aplicada con éxito en sistemas modelo como la disolución de metanol y naftaleno en CO_2 supercrítico[119,120] o el efecto del cosolvente en CO_2.[121] Estos estudios son un ejemplo de cómo las simulaciones computacionales, que actualmente está abordando nuestro grupo investigador, pueden proporcionar información precisa y exacta sobre propiedades termoquímicas y, a partir de ellas, obtener correlaciones y predicciones que ayuden a optimizar de manera racional el diseño de los procesos de extracción en medios supercríticos.

Como se ha reflejado a lo largo de estas páginas, las posibilidades de transferencia de conocimiento desde los fundamentos termodinámicos mediante el establecimiento de sinergias adecuadas alcanzan a campos muy diversos. Y es precisamente en las áreas comunes donde pueden encontrarse las mejores oportunidades de aplicación de los estudios fundamentales.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos del Gobierno de España MEC-FEDER (CTQ2006-15597-C02-02) y MINCINN-FEDER (CTQ2009-14629-C02-02), del Gobierno de Aragón (PI068/08 y Grupo E-52) y DGA-La Caixa (2008/200-1) y de la Unión Europea (Eurostars, Proposal No. E! 4428) y es una pequeña muestra de la evolución de las labores de más de cuatro décadas de investigación dirigida por el Catedrático de Química Física José S. Urieta. Así mismo, querría agradecer a los Doctores Carlos Cativiela (Química Orgánica-IUCH-Unizar), Alberto Coronas (Ingeniería Química-CREVER-URV), Josefa Fernández (Física Aplicada-USC), Antonio M. F. Palavra (Ingeniería Química-IST-UTL), Juan Cacho (Química Analítica-I3A-Unizar), Carmen Maestro (Forestales-CITA-DGA) y a D. Jesús Burillo (Aromáticas y Medicinales-CITA-DGA) las posibilidades de poder "ver" más allá de los fundamentos para poder crecer en su entendimiento y aplicación. Mi agradecimiento especial a la Real Academia de Ciencias de Zaragoza por haberme distinguido con su mención y en particular a la Sección de Químicas y a su Presidente el Profesor Luis Oro.

Referencias

(1) C. Reichardt. *"Solvents and Solvent Effects in Organic Chemistry"*, Third Edition. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. **2003**

(2) C. Cativiela, J. I. García, J. A. Mayoral y L. Salvatella. Modelling of solvent effects on the Diels-Alder reaction. *Chem. Soc. Rev.*, **1996**, *25*, 209-218.

(3) H. J. Schneider y N. K. Sangwan. Diels-Alder reactions in hydrophobic cavities - a quantitative correlation with solvophobicity and rate enhancements by macrocycles. *J. Chem. Soc.*, *Chem. Commun.*, **1986**, *24*, 1787-1789.

(4) N. K. Sangwan y H. J. Schneider. The kinetic effects of water and of cyclodextrins on Diels-Alder reactions - host-guest chemistry .18. *J. Chem. Soc.*, *Perkin Trans. 2*, **1989**, *9,* 1223-1227.

(5) C. Cativiela, J. A. Mayoral, A. Avenoza, J. M. Peregrina y M. A. Roy. Correlations of rate and selectivity of a diels-alder reaction with sp parameters. *J. Phys. Org. Chem.*, **1990**, *6*, 414-418.

(6) C. Cativiela, J. I. García, J. A. Mayoral, A. Avenoza, J. M. Peregrina y M. A. Roy. Development of a model to explain the influence of the solvent on the rate and selectivity of diels-alder reactions. *J. Phys. Org. Chem.*, **1991**, *4*, 48-52.

(7) C. Cativiela, J. I. García, J. A. Mayoral, A. J. Royo, L. Salvatella, X. Assfeld y M. F. Ruiz-López. Experimental and theoretical-study of the influence of the solvent on asymmetric Diels-Alder reactions. *J. Phys. Org. Chem.*, **1992**, *5*, 230-238.

(8) C. Cativiela, J. I. García, J. A. Mayoral, A. J. Royo and L. Salvatella. Fluorinated alcohols as solvents for Diels-Alder reactions of chiral acrylates. *Tetrahedron:Asymmetry*, **1993**, *4 (7)*, 1613-1618.

(9) C. Cativiela, J. I. García, J. A. Mayoral and L. Salvatella. On the role of hexafluoroisopropanol in Diels-Alder reactions of acid-sensitive reagents. *Can. J. Chem.*, **1994**, *72*, 308-311.

(10) J. P. Bégué, D. Bonnet-Delpon, B. Crousse. Fluorinated alcohols: a new medium for selective and clean reaction. *Synlett,* **2004**, *1*, 18-29.

(11) L. Eberson, M. P. Hartshorn, O. Persson. 1,1,1,3,3,3-Hexafluoropropan-2-ol as a solvent for the generation of highly persistent radical cations. *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 2*, **1995**, *9*, 1735-1744.

(12) M. J. Kamlet, J. L. M. Abboud, M. H. Abraham, R. W. Taft. Linear solvation energy relationships .23. A comprehensive collection of the solvatochromic parameters, pi-star, alpha and beta, and some methods for simplifying the generalized solvatochromic equation. *J. Org. Chem.*, **1983**, *48 (18)*, 2877-2887.

(13) M. Fabbrini, G. Galli, P. Gentili, D. Macchitella, H. Petride. Aromatic iodination: a new investigation on the nature of the mechanism. *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 2*, **2001**, *9*, 1516-1521.

(14) L. Biczók, H. Linschitz, Oxidation of triplet C-60 by hydrogen-bonded chloranil: Efficient formation, spectrum and charge-shift reactions of C-60+center dot cation radical. *J. Phys. Chem. A*, **2001**, *105(49)*, 11051-11056.

(15) V. Dichiarante, M. Fagnoni, M. Mella, A. Albini. Intramolecular photoarylation of alkenes by phenyl cations. *Chem. Eur. J.*, **2006,** *12 (14)*, 3905-3915.

(16) J. H. Horner, E. Taxil, M. Newcomb. Laser Flash-Photolysis Kinetic-Studies of Enol Ether Radical Cations - Rate Constants for Heterolysis of Alpha-Methoxy-Beta-Phosphatoxyalkyl Radicals and for Cyclizations of Enol Ether Radical Cations. *J. Am. Chem. Soc.*, **2002**, *124 (19)*, 5402-5410.

(17) R. Xue, S. Wang, H. Qi, Y. Song, S. Xiao, C. Wang, F. Li. Structure and topology of Slc11a1(164-191) with G169D mutation in membrane-mimetic environments. *J. Structural Biology*, **2009**, *165 (1)*, 27–36

(18) M. A Castiglione-Morelli, P. Cristinziano, A. Pepe, P. A. Temussi. Conformation-activity relationship of a novel peptide antibiotic: Structural characterization of dermaseptin DS 01 in media that mimic the membrane environment. *Biopolymers (Peptide Sci.)*, **2005**, *80*, 688–696.

(19) J. H. Chill, J. M. Louis, C. Miller, A. Bax. NMR study of the tetrameric KcsA potassium channel in detergent micelles Bax, *Protein Sci*. **2006**, *15 (4)*, 684–698.

(20) A. M. Tamburro, A. Pepe, B. Bochicchio. Localizing alpha-helices in human tropoelastin: Assembly of the elastin "puzzle". *Biochemistry*, **2006**, *45*, 9518–9530.

(21) C. Cativiela, J. I. García, J. Gil, R. M. Martínez, J. A. Mayoral, L. Salvatella, J. S. Urieta, A. M. Mainar and M. H. Abraham, Solvent effects on Diels-Alder reactions. The use of aqueous mixtures of fluorinated alcohols and the study of reactions of acrylonitrile. *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 2*, **1997**, *3*, 653-660.

(22) A. Ben-Naim. Statistical mechanical study of hydrophobic interaction .I. Interaction between 2 identical nonpolar solute particles. *J. Chem. Phys*., **1971**, *54*, 1387-1404.

(23) H. S. Frank and M. W. Evans. Free volume and entropy in condensed systems .3. Entropy in binary liquid mixtures - partial molal entropy in dilute solutions - structure and thermodynamics in aqueous electrolytes. *J. Phys. Chem.*, **1945**, *13*, 507-532.

(24) M. H. Abraham, P. L. Grellier, and R. A. McGill. A quantitative measure of solvent solvophobic effect. *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 2*, **1988**, 339-345.

(25) R. A. Pierotti. Solubility of gases in liquids. *J. Phys. Chem.*, **1963**, *67*, 1840-1845.

(26) E. Wilhelm, R. Battino, R. J. Wilcock. Low-pressure solubility of gases in liquid water. C*hem. Rev.*, 1977, 77 (2), 219–262

(27) H. L. Clever. The solubility of argon and krypton in p-xylene and p-xylene-p-dihalobenzene mixtures at 30-degrees. *J. Phys. Chem.*, **1957**, *61 (8)*, 1082-1083.

(28) H. L. Clever. The solubility of xenon in some hydrocarbons. *J. Phys. Chem.*, **1958**, *62 (3)*, 375-376.

(29) H. L. Clever, R. Battino, J. H. Saylor y P. M. Gross. The solubility of helium, neon, argon and krypton in some hydrocarbon solvents. *J. Phys. Chem*., **1957**, *61 (8)*, 1078-1082.

(30) H. L. Clever, J. H. Saylor y P. M. Gross. The solubility of helium, neon, argon, krypton and xenon in methylcyclohexane and perfluoromethylcyclohexane. *J. Phys. Chem.,* **1958**, *62 (1)*, 89-91.

31 J. H. Saylor, R. Battino. The solubilities of the rare gases in some simple benzene derivatives. *J. Phys. Chem.,* **1958**, *62 (10)*, 1334-1337.

(32) H. König. Über die löslichkeit der edelgase in meerwasser, *Z. Naturforsch*. **1963**, *18A (3)*, 363-367

(33) M. W. Cook, U. S. Atomic Energy Commission, UCRl-2459, Jan 14, **1954** (Ph.D. Thesis).

(34) M. W. Cook y D. N. Hanson. Accurate measurement of gas solubility. *Rev. Sci. Instr.*, **1957**, *28 (5)*, 370-374.

(35) A. Ben-Naim y S. Baer. Method for measuring solubilities of slightly soluble gases in liquids. *Trans. Faraday Soc.*, **1963**, *59 (492)*, 2735-2738.

(36) P. F. Scholander. Analyzer for accurate estimation of respiratory gases in one-half cubic centimeter samples. *J. Biol. Chem.*, **1947**, *167 (1)*, 235-250.

(37) E. Douglas. Solubilities of oxygen, argon and nitrogen in distilled water *J. Phys. Chem.*, **1964**, *68 (1)*, 169-174.

(38) L. Clever and R. Battino, chapter 2.1 in *The experimental determination of solubilities*, Wiley Series in Solution Chemistry (Volume 6). John Wiley & Sons, LTD, Chichester, England, **2003.**

(39) J. Carnicer, F. Gibanel, J. S. Urieta y C. Gutiérrez Losa. Aparato para la medida de solubilidades de gases en líquidos. Solubilidades de He, D_2, N_2 y SF_6 en p-xileno. *Rev. Acad. Ciencias Zaragoza,* **1979**, *34*, 115-122.

(40) A. M. Mainar, *Estudio termodinámico de las solubilidades de gases no polares en mezclas agua+2,2,2-trifluoroetanol a 298.15 K.* Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza **1995**.

(41) A. M. Mainar, *Solubilidades de gases no polares en mezclas H_2O+2,2,2-trifluoroetanol y H_2O+1,1,1,3,3,3-hexafluoroisopropanol.* Tesis Doctoral y Premio Extraordinario. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza, **2000**.

(42) A. M. Mainar, J. I. Pardo, J. Santafé, J. S. Urieta. Solubility of gases in binary liquid mixtures: An experimental and theoretical study of the system noble gas plus trifluoroethanol plus water. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2003**, *42 (7)*, 1439-1450.

(43) S. Fernando, B. Cardil, M. Domínguez, A. M. Mainar, J. S. Urieta, *Una Pieza Clave en el Método Científico: Validación de dispositivos Experimentales.- Solubilidad de Gases en Líquidos*. XXIX Bienal de Física y Química. Madrid, **2003**.

(44) B. Cardil, A. M. Mainar, J. I. Pardo, M. Domínguez, J. Santafé *Solubilidades de Gases Nobles en Mezclas Acuosas Diluidas de 2,2,2-Trifluoroetanol*. XXIX Bienal de Física y Química. Madrid, **2003**.

(45) M. T. López, S. Altabás, J. Santafé, J. I. Pardo, A. M. Mainar. *Explorando el Efecto del Cosolvente en la Solubilidad de Gases Nobles en Agua*. XXX Bienal de Física. Orense, **2005**.

(46) T. Takamuku, T. Kumai, K. Yoshida, T. Otomo, and T. Yamaguchi. Structure and dynamics of halogenoethanol-water mixtures studied by large-angle x-ray scattering, small-angle neutron scattering, and NMR relaxation. *J. Phys. Chem. A* **2005,** *109,* 7667-7676.

(47) Libro Blanco: *Una Política Energética para la Unión Europea*. Bruselas, **1995**, COM(95) 682

(48) Libro Verde: *Sobre la eficiencia energética; como hacer más con menos*. Bruselas, **2005**. COM(2005)265.

(49) *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. ONU, **1998**. GE.05-61702 (S) 130605.

(50) Manual del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la Capa de Ozono. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA- ONU). 7.ª Ed. Nairobi, Kenia, **2006**.

(51) Medrano, M.; Bourouis, M.; Coronas, A. Double-Lift Absorption Refrigeration Cycles Driven by Low-Temperature Heat Sources Using Organic Fluid Mixtures as Working Pairs. *Appl. Energy* **2001**, *68*, 173

(52) Boer, D.; Vallés, M.; Coronas, a. Performance of double effect absorption-compression cycles for air conditioning using methanol-TEGDME and TFE-TEGDME systems as working pairs. *Int. J. Refrig*. **1998**, *21*, 542.

(53) Levy, A.; Jelinek, M.; Borde, I. Single stage absorption system based on refrigerants R125 and R134A with DMETEG. *Therm. Sci.* **2000**, *1*, 511.

(54) J. Herráiz Fernández, *Equilibrio líquido vapor de fluidos orgánicos para ciclos de absorción*. Tesis Doctoral. Departament d'Enginyeria Mecànica. Universitat Rovira i Virgili. Tarragona**, 2001**.

(55) H. O. Spauschus. Lubricants for refrigeration compressors: A 1996 status report. *Bull. Int. Inst. Refrig*. **1997**, *97*, 3.

(56) K. N. Marsh, M. E. Kandil. Review of thermodynamic properties of refrigerants + lubricant oils. *Fluid Phase Equilib.* **2002**, *199*, 319-334.

(57) S. I. Tseregounis, M. J. Riley. Solubility of HFC-134a refrigerant in glycol-type compounds: effects of glycol structure. *AIChE J.* **1994**, *40*, 726-737.

(58) E. R. López, A. M. Mainar, J. García, J. S. Urieta, J. Fernández. Experimental and predicted solubilities of HFC134a (1,1,1,2-tetrafluoroethane) in polyethers. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2004**, *43*, 1523–1529.

(59) A. Coronas, A. M. Mainar, K. R. Patil, A. Conesa, S. Shen, S. Zhu. Solubility of 1,1,1,2-tetrafluoroethane in triethylene glycol dimethyl ether. *J. Chem. Eng. Data,* **2002**, *47*, 56-58

(60) H. Renon, J. M. Prausnitz. Local compositions in thermodynamic excess functions for liquid mixtures, *AIChE J.*, **1968**, *14(1)*, 135-144.

(61) A. Fredenslund, R. L Jones, J. M. Prausnitz. Group-contribution estimation of activity coefficients in nonideal liquid mixtures. *AIChE J.* **1975**, *21*, 1086-1099.

(62) J. Gmehling, J. Li, M. A. Schiller. Modified UNIFAC model. 2. Present parameter matrix and results for different thermodynamic properties. *Ind. Eng. Chem. Res.* **1993**, *32*, 178-193.

(63) M. Kleiber, J. K. Axmann. Evolutionary algorithms for the optimization of modified UNIFAC parameters. *Comput. Chem. Eng.* **1998**, *23*, 63-82.

(64) S.K. Chaudhari, D. Salavera, X. Esteve, A. Coronas, Vapour–liquid equilibria of the system 1,1,1,2-tetrafluoroethane + monoethylene-glycol dimethylether from 283.15 to 353.15 K: New modified UNIFAC parameters. *Fluid Phase Equilibr.* **2008,** *271*, 28–33.

(65) E. R. López, A. M. Mainar, J. S. Urieta, J. Fernández. Solubility of HFC134a (1,1,1,2-tetrafluoroethane in two dialkyl carbonates. *J. Chem. Eng. Data,* **2009**, *54 (9)*, 2609–2615.

(66) J. H. Hildebrand, R. L. Scott. *The solubility of non-electrolytes*, 3rd ed., Reinhold Publ. Corp.: New York, **1950**.

(67) J. H. Hildebrand, R. L. Scott. *Regular solutions,* Prentice Hall: Englewood Cliff, New Jersey, **1962**.

(68) C. M. Hansen, Universality of the solubility parameter. *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.* **1969**, *8*, 2-11.

(69) R. A. Martin, K. L. Hoy. *Tables of Solubility Parameters*; Research and Development Department, Union Carbide: Tarrytown, New York, **1975**.

(70) T. Uemura. Working medium-absorbent systems for absorption refrigeration machine, absorption heat pump and heat transformer. *Refrigeration* **1993**, *68*, 699-709.

(71) S. Iyoki, S. Iwasaki, Y. Kuriyama, T Uemura. Solubilities of the two ternary systems water + lithium bromide + lithium iodide and water + lithium chloride + lithium nitrate at various temperatures. *J. Chem. Eng. Data* **1993**, *38*, 396-398.

(72) S. Iyoki, R. Yamanaka, T. Uemura. Physical and thermal properties of the water-lithium bromide-lithium nitrate system. *Int. J. Refrig.* **1993**, *16*, 191-200.

(73) K. K. Koo, H. R. Lee, S. Y. Jeong, Y. S. Oh, D. R. Park, Y. S. Baek. Densities, viscosities, and surface tensions of the (water + lithium bromide + lithium nitrate + lithium iodide + lithium chloride) system. *J. Chem. Eng. Data* **1999**, *44*, 1175-1177.

(74) K. K. Koo, H. R. Lee, S. Y. Jeong, Y. S. Oh, D. R. Park, Y. S. Baek. Solubilities, Vapor Pressures and Heat Capacities of the Water + Lithium Bromide + Lithium Nitrate + Lithium Iodide + Lithium Chloride System. *Int. J. Thermophys.* **1999**, *20*, 589- 600.

(75) D. Salavera Muñoz. *Determinación experimental de las densidades, solubilidades y viscosidades del sistema LiBr+LiNO$_3$+LiI+LiCl+H$_2$O.* Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza, **2002**.

(76) D. Salavera, X. Esteve, K. R. Patil, A. M. Mainar y A. Coronas, Solubility, Heat Capacity, and Density of Lithium Bromide + Lithium Iodide + Lithium Nitrate + Lithium Chloride Aqueous Solutions at Several Compositions and Temperatures. *J. Chem. Eng. Data* **2004,** *49,* 613-619.

(77) D. Salavera Muñoz. *Propiedades Termofísicas de Nuevos Fluidos de Trabajo.* Tesis Doctoral. Departament d'Enginyeria Mecànica. Universitat Rovira i Virgili. Tarragona, **2005**.

(78) M. Medrano Martorell. *Desarrollo de un absorbedor tubular vertical enfriado por aire para un climatizador de absorción de agua-bromuro de litio.* Tesis Doctoral. Departament d'Enginyeria Mecànica. Universitat Rovira i Virgili. Tarragona, **2000**.

(79) M. Bourouis, M. Vallès, M. Medrano, A. Coronas, Performance of air-cooled absorption air-conditioning systems working with water-(LiBr + Lil + LiNO$_3$ + LiCl)**.** *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, **2005**, *219 (2)*, 205-213.

(80) S. N. Libotean. *Caracterización termofísica de la mezcla ternaria amoníaco /(nitrato de litio + agua) para aplicaciones de refrigeración por absorción*. Tesis Doctoral. Departament d'Enginyeria Mecànica. Universitat Rovira i Virgili. Tarragona, **2008**.

(81) S. Libotean, A. Martín, D. Salavera, M. Valles, X. Esteve y A.Coronas. Densities, viscosities, and heat capacities of ammonia + lithium nitrate and ammonia + lithium nitrate + water solutions between (293.15 and 353.15) K. *J. Chem. Eng. Data*, **2008**, *53 (10)*, 2383–2388.

(82) S. Libotean, D. Salavera, M. Valles, X. Esteve y A.Coronas. Vapor−liquid equilibrium of ammonia + lithium nitrate + water and ammonia + lithium nitrate solutions from (293.15 to 353.15) K. *J. Chem. Eng. Data*, **2007**, *52 (3)*,1050–1055.

(83) S. Steiu, J.C. Bruno, A. Coronas, M. F. San Román, I. Ortiz. Separation of ammonia/water/sodium hydroxide mixtures using reverse osmosis membranes for low-temperature driven absorption chillers. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2008**, *47*, 10020–10026.

(84) S. Steiu, D. Salavera, J. C. Bruno, A. Coronas. A basis for the development of new ammonia–water–sodium hydroxide absorption chillers. *Int. J. Refrig.*, **2009**, *32*, 577-587.

(85) M. Venegas, P. Rodríguez, A. Lecuona, M. Izquierdo, Spray absorbers in absorption systems using lithium nitrate–ammonia solution. *Int. J. Refrig.* **2005**, *28*, 554–564.

(86) J. M. Calm. Options and outlook for chiller refrigerants. *Int. J. Refrig.* **2002**, *25*, 705–715.

(87) J. M. Calm. Comparative efficiencies and implications for greenhouse gas emissions of chiller refrigerants. *Int. J. Refrig.* **2006**, *29*, 833–841.

(88) S. F. Pearson. Refrigerants past, present and future. *Bull. IIR* **2004**, *3*, 5–26.

(89) J. Fleming. Carbon dioxide as the working fluid in heating and/or cooling systems. *Bull. IIR* **2003**, *4*, 6–15.

(90) M.-H. Kim, J. Pettersen, C. W. Bullard. Fundamental process and system design issues in CO2 vapor compression systems. *Prog. Energy Combust. Sci.* **2004**, *30*, 119–174.

(91) J.-P. Lee. Experimental and theoretical investigation of oil retention in a carbon dioxide air-conditioning system. *CEEE;* University of Maryland: College Park, MD, **2003**.

(92) C. Dang, K. Iino, K. Fukuoka, E. Hihara. Effect of lubricating oil on cooling heat transfer of supercritical carbon dioxide. *Int. J. Refrig.* **2007**, *30*, 724–731.

(93) O. Fandiño, E. R. López, L. Lugo, M. Teodorescu, A. M. Mainar, and J. Fernández. Solubility of carbon dioxide in two pentaerythritol ester oils between (283 and333) K. *J. Chem. Eng. Data* **2008,** *53,* 1854–1861.

(94) S. Maaβen, A. Reichl, H. Knapp. Measurements at high dilution: Ecological significance. *Fluid Phase Equilib.* **1993**, *82*, 71–78.

(95) W. M. Melzer, F. Schrodter, H. Knapp, H. Solubilities of methane, propane and carbon dioxide in solvent mixtures consisting of water, N,N-dimethylformamide, and N-methyl-2-pyrrolidone. *Fluid Phase Equilib.* **1989**, *49*, 167–186.

(96) A. Wahlström, L. Vamling. The solubility of HCFC22, CFC114 and HFC152a in n-hexadecane. *Can. J. Chem. Eng.* **1996**, *74*, 426–428.

(97) S. Bobbo, M. Scattolini, R. Camporese, L. Fedele, R. Stryjek. Solubility of carbon dioxide in Pentaerythritol esters. *IIR Conferences in Vicenza*, Vicenza, Italy, **2005**.

(98) P. N. Price y C. M. Oldenburg, The consequences of failure should be considered in sitting geologic carbon sequestration projects, *Int. J. Greenh. Gas Con.* **2009**, *3 (5)*, 658-663.

(99) A European Platform for Sustainable Chemistry. CEFIC - July 2004 - Dépôt légal D/3158/2004/1

(100) E. J. Beckman, Supercritical and near-critical CO_2 in green chemical synthesis and processing. *J. Supercrit. Fluids*, **2004**, *28*, 121-191.

(101) M. McHugh, V. Kukronis. *Supercritical Fluid Extraction*. 2ª Edición, Butterworth-Heinemann, Boston, **1994**.

(102) L .T. Taylor, *Supercritical Fluid Extraction*. J. Wiley&Sons, New York **1996.**

(103) P. T. V. Rosa, M. Angela, A. Meireles, Supercritical technology in Brazil: system investigated (1994-2003). *J. Supercrit. Fluid*, **2005,** *34*, 109-117.

(104) Isi Web of KnowledgeSM, Thomson Reuters, Copyright © **2009**. http://isiwebofknowledge.com/

(105) E. Langa, J. Cacho, A.M.F. Palavra, J. Burillo, A.M. Mainar, J.S. Urieta, The evolution of hyssop oil composition in the supercritical extraction curve Modelling of the oil extraction process. *J. Supercrit. Fluid,* **2009,** *49*, 37–44.

(106) E. Langa Morales. *Extracción con CO_2 Supercrítico de aceites esenciales de plantas aromáticas.* Tesis Doctoral. Área de Química Física. Universidad de Zaragoza. Zaragoza, **2007**.

(107) E. Langa, G. Della Porta, A.M.F. Palavra, J.S. Urieta, A.M. Mainar, Supercritical fluid extraction of Spanish sage essential oil: Optimization of the process parameters and modelling. *J. Supercrit. Fluid* **2009**, *49*, 174–181.

(108) J. Burillo, Investigación y experimentación de plantas aromáticas y medicinales en Aragón. Cultivo, transformación y analítica, Gobierno de Aragón, Zaragoza, **2003**.

(109) N.S.L. Perry, P.J. Houghton, J. Sampson, A.E. Theobald, S. Hart, M. Lis-Balchin, J.R.S. Hoult, P. Evans, P. Jenner, S. Milligan, E.K. Perry, In-Vitro activity of *S-lavandulaefolia* (Spanish sage) relevant to treatment of Alzheimer's disease, *J. Pharm. Pharmacol.*, **2001**, *53 (10)*, 1347–1356.

(110) N.S.L. Perry, P.J. Houghton, A. Theobald, P. Jenner, E.K. Perry, In-Vitro inhibition of human erythrocyte acetylcholinesterase by *Salvia lavandulaefolia* essential oil and constituent terpenes, *J. Pharm. Pharmacol.* **2000**, *52 (7)*, 895–902.

(111) H. Sovová, Mathematical model for supercritical fluid extraction of natural products and extraction curve evaluation, *J. Supercrit. Fluid*, **2005**, *33*, 35–52.

(112) Frost & Sullivan. European Biopesticide Market. **2001.** Disponible en http://*www.frost.com*

(113) Elisa Langa, Beatriz Berrueco, Carmen Maestro, José S. Urieta Ana M. Mainar. *Antioxidant Activity of Supercritical Extracts of Populus Buds*. 11th European Meeting on Supercritical Fluids. Barcelona (Spain), **2008**.

(114) B. Berrueco, C. Maestro, L. Martín, J. S. Urieta, A.M. Mainar. Extracción de mezclas con propiedades antioxidantes procedentes de *Populus nigra*. XI Encuentro Inter-bienal del Grupo Especializado de Termodinámica (Reales Sociedades de Química y Física). Jaca-Zaragoza. **2008**.

(115) B. Berrueco, C. Maestro, L. Martín, J. S. Urieta, A.M. Mainar en *La investigación del Grupo Especializado de Termodinámica de las Reales Sociedades de Física y Química*, Volumen 4, pp 191-201. Reales Sociedades Españolas de Física y Química. Zaragoza. **2008**.

(116) B. Berrueco, *Revalorización de residuos forestales: Extracción con CO2 Supercrítico y Aplicaciones de Principios Activos de Populus nigra* L. Postgrado de Iniciación a la Investigación en Áreas Científicas. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza, **2009**.

(117) H. Sixto, M. J. Hernández, M. Barrio, J. Carrasco e I. Cañellas. Plantaciones del género Populus para la producción de biomasa con fines energéticos: revisión. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, **2007**, *16(3)*, 277-294.

(118) J. I. Siepmann, S. Karaborni, B.Smit. Simulating the critical-behavior of complex fluids. *Nature*, **1993**, *365 (6444)*, 330-332.

(119) J. M. Stubbs, J. I. Siepmann. Binary phase behavior and aggregation-of dilute methanol in supercritical carbon dioxide: A Monte Carlo simulation study. *J. Chem. Phys.,* **2004**, *121 (3)*, 1525-1534.

(120) J. M. Stubbs, D. D. Drake-Wilhelm, J. I. Siepmann. Partial molar volume and solvation structure of naphthalene in supercritical carbon dioxide: A Monte Carlo simulation study. *J. Phys. Chem. B*, **2005**, *109 (42)*, 19885-19892.

(121) K. E. Anderson, J. I. Siepmann. Solubility in supercritical carbon dioxide: Importance of the Poynting correction and entrainer effects. *J. Phys. Chem. B*, **2008**, *112 (36)*, 11374-11380.

Rev. Real Academia de Ciencias. Zaragoza. **64:** 35–49, (2009).

Inestabilidad en el desarrollo y cambio global en plantas

Concepción L. Alados

Instituto Pirenaico de Ecología. (CSIC)

Avda. Montañana 1005, 50192 Zaragoza. Spain

Premio a la Investigación de la Academia 2009. Sección de Naturales

1 Introducción

Los ecosistemas son sistemas complejos constituídos por entidades que tienen la capacidad de adaptarse y cambiar en respuesta a las condiciones que le rodean. A diferencia de los sistemas físicos, los sistemas biológicos son procesos irreversibles asociados al vector tiempo. Es sólo a través de esta irreversibilidad que la vida es posible (Prigogine, 1997). La dinámica del ecosistema depende de la dinámica de las interacciones que en el subyacen. Para aproximarnos al estudio y comprensión de estos tipos de sistemas necesitamos desarrollar herramientas adecuadas que sean capaces de reflejas la complejidad del mismo y que permitan detectar cambios drásticos en la integridad ecológica de los ecosistemas antes de que la degradación sea irreversible. Así, en muchas ocasiones resulta más eficaz detectar el deterioro temprano del ecosistema mediante el estado de las poblaciones más sensibles al estrés, que esperar a que la diversidad y productividad del ecosistema disminuya de manera perceptible, y sean estos síntomas precursores de cambios irreversibles.

Debido a la actual tendencia de rápido deterioro del planeta causado por el calentamiento del clima y el impacto antrópico, se hace cada vez más necesario el desarrollo de indicadores ecológicos (Dale y Beyeler, 2001; Fisher et al., 2003). De acuerdo con el (IPCC, 2001), la temperatura global del aire ha incrementado una media de 0.6 durante el siglo XX, y se prevé un incremento entre 1.4 y 5.8 C durante el presente siglo. Las zonas áridas y semiáridas se esperan sufran el mayor impacto de la sequía en los próximos años (Peñuelas et al., 2004). Con el fin de prevenir los deterioros que nos amenazan y la pérdida de los recursos naturales en las zonas áridas y semi-áridas necesitamos desarrollar indicadores sensibles y puntos de referencia con criterios uniformes. La mayoría de los indicadores que se están usando se refieren a estándares bioclimáticos o índices basados en

el tipo de suelo y en la erosión del suelo. Indicadores capaces de integrar múltiples escalas y procesos de una manera holística están aún lejos de poder ser aplicados. Para detector estrés hídrico en plantas generalmente se mide el potencial de agua de la planta (Kramer and Boyer, 1995) o medidas de fluorescencia como indicadores de actividad fotosintética (Bilger et al., 1987). También es frecuente el uso de mediadas de biometría como tamaño del cuerpo, o tasa de crecimiento, las cuales son medidas que integran medidas fisiológicas a una escala superior (Roff, 1986; Kozlowski y Wiegert, 1987; Kozlov y Niemela, 1999). Muchas veces este tipo de medidas conducen a conclusiones erróneas en zonas semi-áridas donde las plantas reducen su actividad metabólica y conductividad estomática para resistir los periodos de estrés hídrico (Younis et al., 1993) dando lugar a una reducción de la tasa de crecimiento (Depuit y Caldwell, 1973; Comstock y Ehleringer, 1984; Sultan y Bazzaz, 1993) y a un incremento de la supervivencia (Escós et al., 2000).

2 Inestabilidad en el desarrollo

La inestabilidad en el desarrollo, la incapacidad de un organismo de reducir los errores durante el desarrollo, es una medida que es capaz de integrar la capacidad de un organismo para resistir estrés (Emlen et al., 1993). Este método se usa para detector estrés ambiental en numerosas especies (Markov, 1994; Mller y Swaddle, 1997; Polak, 2003). La inestabilidad en el desarrollo está basada en que bajo condiciones de estrés, las fluctuaciones del entorno ambiental junto con la carencia de energía suficiente para mantener el equilibrio homeostático dan lugar al incremento de las variaciones intra-individuales de estructuras con idéntica influencia genética y ambiental. Por tanto, la inestabilidad en el desarrollo es el resultado de un proceso que altera el desarrollo a lo largo de su trayectoria en un ambiente particular (Palmer, 1994). Hay que diferenciarla de la plasticidad fenotípica, que es la variación fenotípica producida por un genotipo en respuesta a la *variación ambiental* (Bradshaw, 1965). La estabilidad en el desarrollo (lo opuesto a inestabilidad en el desarrollo) es el resultado de los procesos que resisten o amortiguan la alteración de la trayectoria del desarrollo dentro de un *ambiente particular*. La estabilidad en el desarrollo depende de la habilidad de un organismo para amortiguar las perturbaciones ambientales de acuerdo con el proceso de canalización de Waddington (1942). Alteraciones en el desarrollo de un individuo puede afectar negativamente a su *"fitness"*, capacidad del organismo para sobrevivir y propagarse en el tiempo y en el espacio. Por tanto, es de esperar que la selección natural disponga de mecanismos que amortigen el efecto de las perturbaciones ambientales y genéticas en el desarrollo.

No todos los rasgos son igualmente sensibles a los impactos del entorno. Según (Soulé and Cuzin-Roudy, 1982) los rasgos que tienen baja capacidad de heredarse son más sen-

sibles a mostrar inestabilidad en el desarrollo que los que posee alta capacidad de ser heredados. Pero esto no es general para animales y plantas. Mientras que los animales con capacidad de movimiento presentan una alta canalización, las plantas usan de su gran plasticidad para adaptarse a los cambios ambientales. Por ello, las medidas más sensibles de inestabilidad en el desarrollo han sido órganos altamente canalizados en plantas (flores y entrenudos) y órganos poco canalizados en animales, como caracteres sexuales secundarios (plumas remeras, cuernos). Rasgos complejos, que dependen de la coordinación de varios procesos (venas alares en insectos, asimetría de translación o error en la estructuras fractales) son también más sensibles a la manifestación del error en el desarrollo que rasgos más simples (asimetría de hojas). Dado que el *fitness* depende de la expresión fenotípica de rasgos que son funcionalmente importantes para el organismo, la selección natural debería actuar minimizando el error durante el desarrollo de tales rasgos (Fowler and Whitlock, 1994). Se ha observado mayor canalización en rasgos que afectan a la supervivencia de la planta adulta que en los rasgos que afectan a la reproducción en especies leñosas de larga duración, porque la supervivencia tiene un mayor efecto que la reproducción en el éxito y permanencia de la planta a largo plazo. Durante periodos de estrés la planta debe ser capaz de sobrevivir a expensas de la reproducción en un momento concreto. Por ejemplo existe menor coeficiente de variación en estructuras vegetativas que en estructuras florales en *Anthyllis cytisoides* (Escós et al., 2000) o en *Cistus ladanifer* (Alados et al., 1999). Además genotipos que han evolucionado recientemente pueden ser responsables del mayor nivel de inestabilidad en el desarrollo, como lo observado en la especie ginodioécica *Teucrium lusitanicumcuyas* recientemente evolucionadas flores masculinas estériles presentan mayor asimetría que las flores hermafroditas (Alados et al., 1998).

El estudio de la inestabilidad en el desarrollo es una herramienta útil para la detección temprana de estrés producido por numerosas causas desde efectos de tipo antrópico como el efecto de los pesticidas en la mosca *Lucilia cuprina* (Clarke y McKenzie, 1987; Mckenzie y Clarke, 1988) a estrés naturales en el sentido que han actuado durante mucho tiempo y han permitido a los organismos adaptarse a ellos, como por ejemplo el pastoreo o el clima. Estos últimos son más difíciles de distinguir y no son fácilmente deducibles de mediadas tradicionales como biomasa o tasa de crecimiento.

La medida más común usada en detectar inestabilidad en el desarrollo es la asimetría fluctuante (FA)(Møller and Swaddle, 1997), definida como el error en las desviaciones de estructuras bilateralmente simétricas. Se basa en que las partes derecha e izquierda de un organismo con simetría bilateral comparten el mismo genoma y condiciones ambientales, por tanto deberían representar imágenes del espejo. Pequeñas perturbaciones durante el desarrollo, ocasionadas como consecuencia de los procesos celulares, producirán una

desviación en la simetría de las estructuras bilaterales, a menos que un mecanismo compensatorio se desarrolle. La estabilidad en el desarrollo expresa la capacidad del organismo de amortiguar el error durante el desarrollo. Bajo condiciones de estrés un mayor consumo de energía por parte del organismo conduce a una menor capacidad para amortiguar los errores durante el desarrollo; en consecuencia incrementa las desviaciones en las diferencias entre los lados derecho e izquierdo del organismo. La asimetría fluctuante es pues la manifestación del error en el desarrollo (*developmental noise*) y de la inestabilidad en el desarrollo (incapacidad para amortiguar los errores en el desarrollo). Otras formas de asimetría son la asimetría direccional y la anti-simetría. La asimetría direccional se debe a un diferente desarrollo en uno de los lados del órgano medido debido a una selección direccional o a influencias ambientales diferentes en cada lado. Por ejemplo, la posición del corazón en el lado izquierdo. Anti-simetría se refiere a cuando estos efectos actúan independientemente en uno u otro lado del organismo.

Las relaciones alométricas entre las plantas son importantes para mantener la estabilidad mecánica de la planta (Niklas, 1992; Niklas y Buchman, 1994), y deben de ser mantenidas durante el crecimiento. Su naturaleza modular, da lugar a estructuras que se repiten y desarrollan bajo unas mismas circunstancias. Esto le hace ser buenos sujetos para el estudio de inestabilidad en el desarrollo. La asimetría de translación es un caso particular de medidas basadas en ruido estadístico de las relaciones alométricas entre partes de un órgano (Freeman et al., 1993; Graham et al., 1993; Alados et al., 1994; Escós et al., 1997). La asimetría de translación es la relación alométrica entre la longitud del entrenudo y el orden del nudo (Fig. 1) se define por la siguiente ecuación:

$$L_(N) = kN^a e^{-bN},$$

donde el parámetro a representa el crecimiento exponencial, el parámetro b representa la inhibición por crecimiento. Su inverso, $1/b$; representa la distancia del entrenudo a partir del cual estos comienzan a decrecer. k es el valor del corte con la recta, las condiciones de partida de la longitud de los entrenudos. El ajuste de los puntos a la ecuación teórica nos indica la capacidad de la planta para mantener la estabilidad durante el desarrollo. Cuanto mayor sea el coeficiente de determinación R^2 menor es el estrés de la planta.

Figura 1.— Ilustración de una rama de *A. cytisoides* de 2 años de edad. L1 a L9 representan las longitudes de los entrenudos desde el primero a la base de la inflorescencia. LF representa la longitud de la inflorescencia y LV la longitud de la parte vegetativa del tallo anual.

3 Efecto del déficit hídrico en la inestabilidad en el desarrollo

La respuesta fisiológica de las plantas al estrés hídrico depende del rango de sequía al que las plantas estén adaptadas (Chapin, 1988). Plantas que han experimentado sequía de forma habitual es de esperar que sean capaces de resistir mejor la sequia que otras que no se enfrentan a tales situaciones. Así las plantas que se enfrentan con frecuencia a estrés hídrico desarrollan estrategias conservativas consistentes en reducir el crecimiento bajo condiciones de escasez de agua (Grime, 1979; Chapin, 1991) mientras son capaces de mantener el funcionamiento de las estructuras fundamentales para mantener su capacidad de supervivencia y permanencia a largo plazo. Por el contrario, plantas que viven en unas condiciones más favorables presentan estrategias más competitivas (Bertness, 1994), invirtiendo más energía en producción y desarrollo, y son capaces de mantener la estabilidad en el desarrollo sólo bajo condiciones favorables.

El cambio en la orientación de la ladera influye en la radiación solar que recibe la planta y en el proceso de evapotranspiración que se relaciona con la humedad del suelo (Ayyad y Dix, 1964; Nevo, 1998) y puede usarse para estudiar la tolerancia de las plantas al déficit de agua. Comparaciones realizadas en plantas que habitan en las orientaciones norte y sur a lo largo de un gradiente climático (256 mm de precipitación anual en Almería y 613 mm en Málaga) y su comparación entre dos periodos, después de un año seco (1995) y después de un periodo húmedo (1997) han permitido detectar respuestas adaptativas a estrés hídrico en *Anthyllis cytisoides*, leguminosa arbustiva de 1 m de altura que ocupa, junto con *Stipa tenacissima*, grandes extensiones de territorio en el sureste Ibérico. En Almería, la lluvia de primavera en 1995 fue solo de 14.5 mm (21% de la media habitual), mientras que en la primavera de 1996 las precipitaciones fueron de 333.29 mm, y en la primavera de 1997 fueron de 104.72 mm. En Málaga, las precipitaciones durante la primavera de 1995 fueron un 64% de la media habitual (48.2 mm) mientras que en la primavera de 1996 llovieron 1179.2 mm y 106.2 mm en la de 1997.

En la Figura 2 observamos cómo las plantas que habitan en las zonas más húmedas (Málaga) presentaron mayor crecimiento anual que las plantas de las zonas más áridas (Almería), e igualmente crecieron más el año más húmedo y en las orientaciones norte. Sin embargo la estabilidad en el desarrollo fue mayor en las zonas orientadas al sur en las áreas más séricas (Almería), después de los periodos secos (1995) y húmedos (1997). Por el contrario las plantas de *A. cytisoides* que habitaban las zonas más húmeda (Málaga) redujeron su estabilidad en el desarrollo durante el periodo más seco (1995) en las zonas orientadas al sur. Así, las plantas habituadas a largos periodos de sequía mostraron una estrategia conservadora, con bajo crecimiento, ahorrando la energía para mantener la homeostasis durante su desarrollo. Esta estrategia es llamada "síndrome de resistencia al

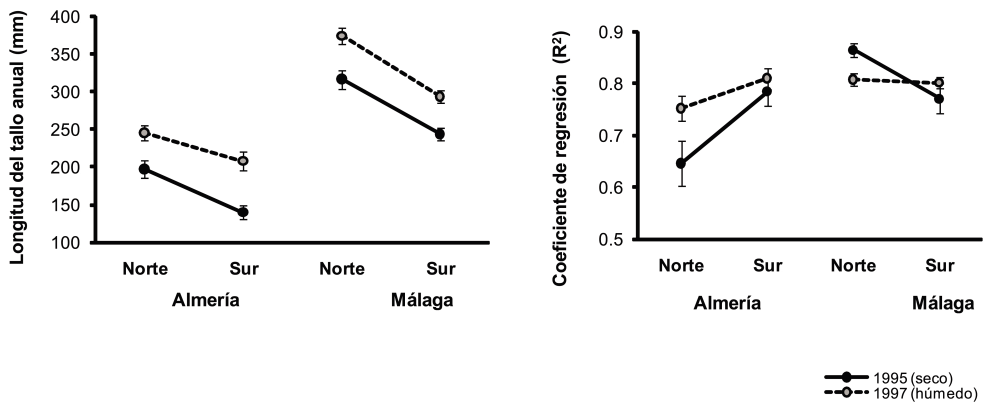

Figura 2.— Representación gráfica de la influencia del déficit de agua en (a) la longitud anual del tallo y en (b) la estabilidad en el desarrollo de *A. cytisoides* medido a través del coeficiente de determinación R^2 de la curva de ajuste de crecimiento de los entrenudos.

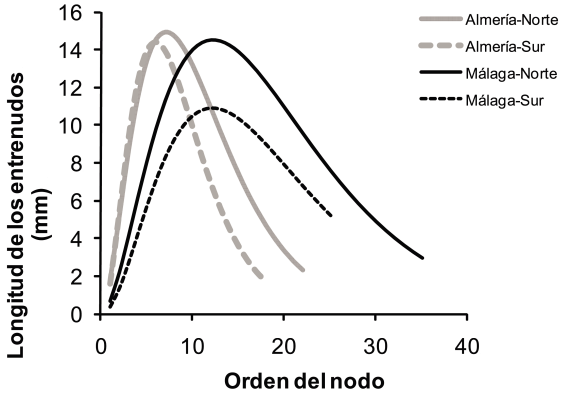

Figura 3.— Representación gráfica del ajuste no lineal, $L_(N) = kN^a e^{-bN}$, entre longitud de los entrenudos (L) y orden de posición en el tallo desde abajo hacia arriba (N) en las poblaciones de Almería y Málaga situadas en orientaciones norte y sur.

estrés" (Grime, 1979; Chapin et al., 1993) muy común en zonas áridas. Cuando la misma planta se desarrolla en hábitats más benignos (Málaga), las condiciones de sequía extrema, como las vividas en 1995 hacen que las plantas orientadas al sur muestren inestabilidad en el desarrollo. Así, la población de Málaga presenta una estrategia competitiva que la hace menos resistente a las condiciones de sequía. Relación positiva entre inestabilidad en el desarrollo y crecimiento se observa también en experimentos con adición de nutrientes (Kozlov et al. 2002).

Además, las plantas que habitaban en las zonas más séricas (Almería) comienzan el crecimiento antes que las plantas que habitan en zonas más húmeda (Málaga), presentando una inhibición apical más temprana y un menor número de entrenudos así como

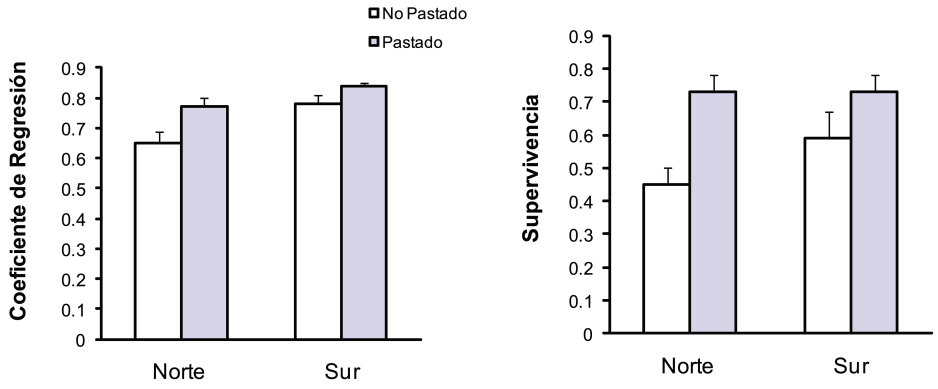

Figura 4.— Representación gráfica de la influencia del pastoreo en (a) la estabilidad en el desarrollo de *A. cytisoides* habitando orientaciones norte y sur, medido a través del coeficiente de determinación R^2 de la curva de ajuste de crecimiento internodal, y en (b) la supervivencia de plantas adultas.

de longitud del brote anual. Como resultado las plantas de Málaga presentaron mayor crecimiento de los brotes anuales. En un experimento realizado en Israel se observó que la variación microclimática en laderas norte y sur actúan como una fuerza evolutiva que da lugar a la evolución de genotipos y fenotipos adaptados a tales circunstancias (Nevo, 1998).

Cuando las poblaciones de *A. cytisoides* eran sometidas a pastoreo extensivo de cabras, las plantas presentaron mayor estabilidad en el desarrollo y mayor supervivencia que las no pastadas, siendo esta diferencia más evidente en las orientaciones sur (Escós et al. 2000). Esto se debe al menor déficit hídrico de las plantas pastadas al haber quitado parte del material fotosintético y reducir por tanto la tasa de evapotranspiración. Este mecanismo se ha observado repetidamente en plantas forrajeras que son pastadas tradicionalmente y han evolucionado con el pastoreo desde hace miles de años.

Otro experimento llevado a cabo en Marruecos en la especie *Argania spinosa*, también mostró una respuesta diferente de las plantas sometidas a diferentes condiciones de gestión a lo largo de un gradiente climático. El argán es una especie ampliamente distribuida en el suroeste de Marruecos (Emberger, 1925; Le Houérou, 1989) cubriendo aproximadamente 828 000 ha (M'Hirit et al., 1998). La población de argán en Marruecos se extiende desde Essaouira hasta el valle de Souss, en el sur. Hacia el interior se extiende a la región de Taroudant (M'hirit et al., 1998). Los árboles adultos son capaces de vivir en condiciones muy áridas, por debajo de 100 mm de precipitación anual. El bosque de argán es usado por sus semillas, de las que se extrae un rico aceite (el aceite de argán), como forraje para las cabras, y para producir cereal bajo su copa, aprovechando la sombra de esta. La

Figura 5.— Distribución de los bosques de *Argania spinosa* en Marruecos y localización de las zonas de estudio.

contribución del argán a la dieta de la cabra en la región oscila entre 47% y el 84% (El Aich et al., 2005). Además, el bosque de argán protege el suelo de la erosión y favorece la biodiversidad de la región. El incremento de la aridez junto a la continua presión humana están poniendo en peligro la persistencia de los bosques de argán (Mellado, 1989; El Yousfi y Benchekroun, 1992).

En 2003 hemos comparado individuos de argán viviendo en condiciones silvestres con individuos viviendo bajo condiciones de cultivo de cereal (dehesa de argán) a lo largo de un gradiente climático, desde la región de Tamanart a unos 70 km de Essaouira, hasta Ait Baha en el sur. En Tamanart y Ait Baha, la precipitación media anual es de 360 mm y 120 mm, respectivamente. En la costa sur, región de Tiznit, la precipitación media anual es de 154 mm (M'Hirit et al., 1998) (Fig. 5).

La población de argán localizada en la zona más árida de su distribución (Ait Baha) presenta la mayor inestabilidad en el desarrollo bajo condiciones silvestres, mostrando de esta forma la sensibilidad de esta especie a la aridez en el extremo árido de su distribución (Fig. 6). Bajo una gestión de dehesa del bosque de argán, su productividad aumenta en la zona más húmeda (Essaouira) y disminuye en la zona más árida de Ait Baha (Alados y El Aich, 2008). Sin embargo la inestabilidad en el desarrollo aumentó en la zona con mayor productividad (Essaouira). Así, la mayor complejidad en la estructura fractal de las ramas de argán en Essaouira da lugar a una mayor condición de estrés, que se manifiesta por medio de la inestabilidad en el desarrollo en los tallos anuales.

Bajo las condiciones naturales (silvestres, no manipuladas) las poblaciones situadas

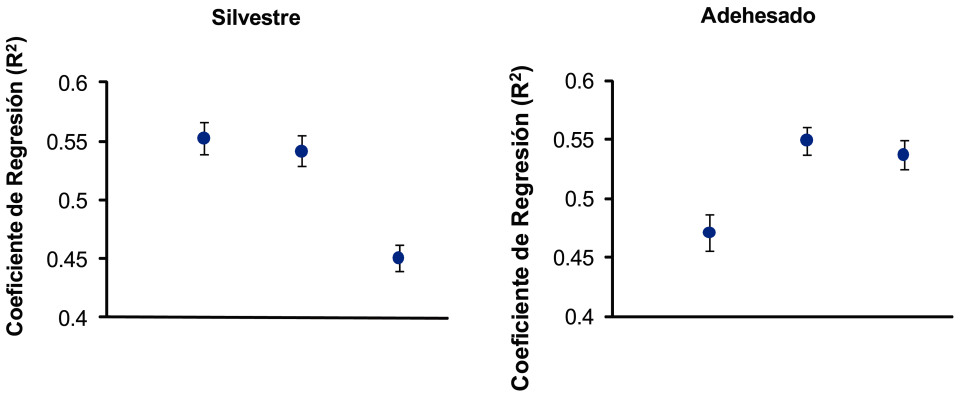

Figura 6.— Representación gráfica de la influencia del déficit de agua en la estabilidad en el desarrollo de *Argania spinosa* medido a través del coeficiente de determinación R^2 de la curva de ajuste de crecimiento internodal en: (a) una población silvestre y (b) una población bajo régimen de dehesa.

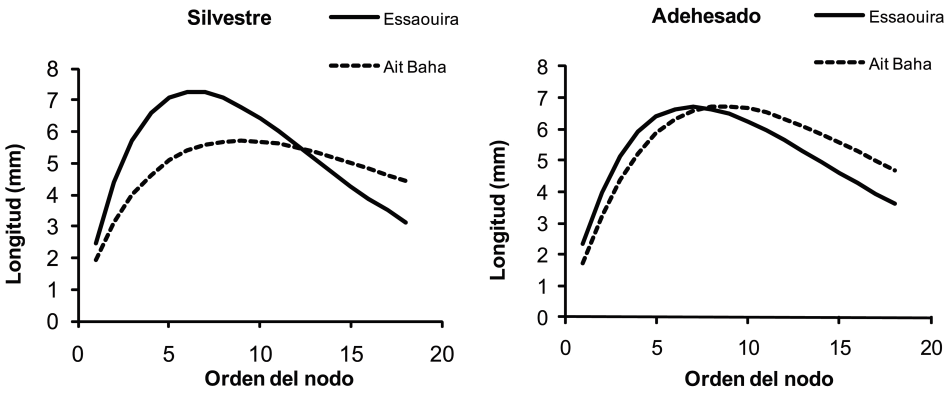

Figura 7.— Representación grafica del ajuste no lineal, $L_(N) = kN^a e^{-bN}$, entre longitud de los entrenudos (L) y orden de posición en el tallo desde abajo hacia arriba (N) en las poblaciones de *Argania spinosa* que habitan Essaouira y Ait Baha bajo condiciones. (a) silvestres y (b) adehesada.

más al norte y con mayor humedad presentan una respuesta más amplia de cambio en el ritmo de crecimiento de los entrenudos que las poblaciones sometidas a gestión adehesada como se observa en la Figura 7.

La inestabilidad en el desarrollo procede de la alteración de procesos de retroalimentación que controlan el crecimiento compensatorio entre partes del cuerpo (Freeman et al., 2003; Kellner y Alford, 2003) y que dan lugar a oscilaciones en la asimetría de las partes derecha e izquierda de los organismos con simetría bilateral, cuya magnitud dependen de la tasa de crecimiento (Emlen et al., 1993). Esto nos hace pensar que las oscilaciones en el crecimiento de las partes de estructuras simétricas pueden ser difíciles de compensar en situaciones de crecimiento rápido. Durante el desarrollo los organismos

dedican energía a amortiguar estas oscilaciones (Palmer y Strobeck, 1986; Emlen et al., 1998), pero cuando hay poca energía disponible, bien porque el estrés la consume (Emlen et al., 1998) o debido a un aumento en la tasa de crecimiento (Freeman et al., 2005), el crecimiento compensatorio no tiene lugar y como consecuencia aumenta la inestabilidad en el desarrollo. Esto explica por qué el crecimiento mayor en la situación de adehesado de Essaouira impone un costo en el desarrollo que se manifiesta en una mayor inestabilidad en el desarrollo. De forma similar Freeman et al. (2005) observó que inestabilidad en el desarrollo puede aparecer no sólo en respuesta estrés sino también a crecimiento rápido.

El reparto de energía en crecimiento o producción vs. procesos de autorganización tales como estabilidad en el desarrollo pueden dar lugar a diferentes manifestaciones de inestabilidad en el desarrollo. Por ejemplo, aunque la asimetría fluctuante en las acículas de *Pinus sylvestris* incrementa en la proximidad a una fuente de polución, el incremento de nutrientes resultó en un incremento en la productividad pero no se redujo la asimetría fluctuante (Kozlov et al., 2002). Otros estudios han indicado también bajo condiciones de estrés una capacidad para preservar la arquitectura de la planta a expensas de productividad (crecimiento y reproducción), lo que le permite mayor tolerancia a las condiciones de estrés (Escós et al., 2000; Alados et al., 2001). Así, la respuesta fisiológica al estrés puede producir una respuesta compensatoria que compromete el control de la homeostasis por encima de la inversión en tasa de crecimiento. Esto puede explicar el por qué los indicadores morfológicos y fisiológicos no están siempre positivamente correlacionados (Duda et al., 2003). La inestabilidad en el desarrollo es, sin embargo, una herramienta que integra en una sola medida respuestas fisiológicas y morfológicas a situaciones de estrés, más integradas cuanto más compleja es la estructura que medimos.

Referencias

[1] Alados, C.L. y El Aich, A., 2008. Stress assessment of argan (Argania spinosa (L.) Skeels) in response to land uses across an aridity gradient: Translational asymmetry and branch fractal dimension. Journal of Arid Environment, 72: 338-349

[2] Alados, C.L., Escós, J. y Emlen, J.M., 1994. Scale asymmetry: a tool to detect developmental instability under the fractal geometry scope. In: M.M. Novak (Editor), Fractals in the Natural and Applied Sciences. Elsevier, North-Holland, pp. 25-36.

[3] Alados, C.L., Navarro, T. y Cabezudo, B., 1999. Tolerance assessment of Cistus ladanifer to serpentine soils by developmental stability analysis. Plant Ecology, 143:51-66.

[4] Alados, C.L., Navarro, T., Cabezudo, B., Emlen, J.M. y Freeman, D.C., 1998. Developmental instability in gynodioecious *Teucrium lusitanicum*. Evolutionary Ecology, 12:21-34.

[5] Alados, C.L., Navarro, T., Escós, J., Cabezudo, B. y Emlen, J.M., 2001. Translational and fluctuating asymmetry as tools to detect stress in stress-adapted and nonadapted plants. International Journal of Plant Sciences, 162: 607-616.

[6] Ayyad, M.A.G. y Dix, R.L., 1964 An analysis of a vegetation microenvironmental complex on prairie slopes in Saskatchewan. Ecological Monographs, 34

[7] Bertness, M.D., y Callaway, R.M., 1994. Positive interactions in communities. Trends in Ecology and Evolution, 9:191-193.

[8] Bilger, W., Schreiber, U. y Lange, O.L., 1987. Chlorophyll fluorescence as an indicator of heat induced limitations of photosynthsis in *Arbutus unedo*. In: G.D. Tenhunen (Editor), Plant response to stress. Springer-Verlag, Berlin, pp. 391-399.

[9] Bradshaw, A.D., 1965. Evolutionary significance of phenotypic plasticity in plants. In: E.W. Caspari and J.M. Thoday (Editor), Advances in genetics. Academic Press New York, pp. 115-155.

[10] Chapin, F.S., 1991. Integrated responses of plants to stress. BioScience 41 29-36.

[11] Chapin, F.S., Autumn, K. y Pugnaire, F., 1993. Evolution of suites of traits in response to environmental stress American Naturalist 142 S78-S92.

[12] Chapin, F.S.I., 1988. Ecological aspects of plant mineral nutrition. Advances in plant nutrition 3:161-191.

[13] Clarke, G.M. y McKenzie, J.A., 1987. Developmental stability of insecticide resistant phenotypes in blowfly; a result of canalizing natural selection. Nature, 325 345-346.

[14] Comstock, J. y Ehleringer, J., 1984. Photosynthetic responses to slowly decreasing leaf water potentials in *Encelia frutescens*. Oecologia, 61:241-248.

[15] Dale, V.H. y Beyeler, S.C., 2001. Challenges in development and use of ecological indicators. Ecological Indicators, 1:3-10.

[16] Depuit, E.J. y Caldwell, M.M., 1973. Seasonal patterns of net photosynthesis of *Artemisia tridentata*. American Journal of Botany, 60:426-435.

[17] Duda, J.J., Freeman, D.C., Brown, M.L., Graham, J.H., Krzysik, A.J., Emlen, J.M., Zak, J.C. y Kovacic, D.A., 2003. Estimating disturbance effects from military training using developmental instability and physiological measures of plant stress. Ecological Indicators, 3:251-262.

[18] El Aich, A., El Assouli, N., Fathi, A., Morand-Fehr, P. y Bourbouze, A., 2005. Ingestive behaviour of grazing goats in the southwestern argan forest of Morocco. Ref. RUMIN 1034.

[19] El Yousfi, S.M. y Benchekroun, F., 1992. La dégradation forestière dans le sud marocain, exemple de l'arganeraie d'Admine (Souss) entre 1969 et 1986. Annales de la Recherche Forestière (Maroc), 26:43-49. Emberger, L., 1925. Le domaine naturel de lárganier. Bulletin de la Société de Botanique de France, 73 770-774.

[20] Emlen, J.M., Emlen , Freeman, D.C. y Graham, J.H., 1993. Nonlinear growth dynamics and the origin of fluctuating asymmetry. Genetica, 89:77 96.

[21] Emlen, J.M., Freeman, D.C., Mills, A. y Graham, J.H., 1998. How organisms do the right thing: the attractor hypothesis. Chaos, 8:717-726.

[22] Escós, J.M., Alados, C.L. y Emlen, J.M., 1997. Grazing impact on plant fractal architecture and fitness of a Mediterranean shrub (*Anthyllis cytisoides*). Functional Ecology, 11:66-78.

[23] Escós, J.M., Alados, C.L., Pugnaire, F.I., Puigdefabregas, J. y Emlen, J.M., 2000. Stress resistance strategy in arid land shrub: interaction between developmental instability and fractal dimenasion. Journal of Arid Environments, 45: 325-336.

[24] Fisher, W.S., Jackson, L.E. y Kurtz, J.C., 2003. US EPA Office of Researh and Development guidelines for technical evaluation of ecological indicators. In: D.J. Rappaport, W.L. Lasley, D.E. Rolston, N.O. Nielson, C.O. Qualset y A.B. Damania (Editor), Managing for Health Ecosystems. Lewis Publishers, New York, p. 1510.

[25] Fowler, K. y Whitlock, M.C., 1994 Fluctuating asymmetry does not increase with moderate inbreeding in Drosophila melanogaster. Heredity 73:373-376.

[26] Freeman, D.C., Brown, M.L., Dobson, M., Jordan, Y., Kizy, A., Micallef, C., Hancock, L.C., Graham, J.H. y Emlen, J.M., 2003. Developmental instability: measures of resistance and resilience using pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). Biological Journal of the Linnean Society, 787:27-41.

[27] Freeman, D.C., Brown, M.L., Duda, J.J., Graham, J.H., Emlen, J.M., Krzysik, A.J., Balbach, H., Kovacic, D.A. y Zak, J.C., 2005. Leaf fluctuating asymmetry, soil disturbance and plant stress: a multiple year comparison using two herbs, *Ipomoea pandurata* and *Cnidoscolus stimulosus*. Ecological Indicators. 5: 85-95

[28] Freeman, D.C., Graham, J.H. y Emlen, J.M., 1993. Developmental stability in plants: symmetries, stress and epigenesis. Genetica, 89:97-119.

[29] Graham, J.H., Freeman, D.C. y Emlen, J.M., 1993. Developmental stability: a sensitive indicator of populations under stress. In: W.G. Ladis, J.S. Hughes y M.A. Lewis (Editor), Environmental Toxicology and Risk Assessment, ASTM STP 1170. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 136-158.

[30] Grime, J.P., 1979. Plant strategies and vegetation processes. John Wiley and Sons, Chichester, U.K.

[31] IPCC, 2001. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2001: The scientific basis. `http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/figts-22.htm`.

[32] Kellner, J.R. y Alford, R.A., 2003. The ontogeny of fluctuating asymmetry. American Naturalist, 161:931-947.

[33] Kozlov, M.V. y Niemela, P., 1999. Difference in needle length - a new and objective indicator of pollution impact on scots pine (*Pinus sylvestris*). Water, Air & Soil Pollution, 116:365-370.

[34] Kozlov, M.V., Niemela, P. y Malkonen, E., 2002. Effects of compensatory fertilization on pollution-induced stress in Scots pine. Water, Air & Soil Pollution, 134:307-318.

[35] Kozlowski, J. y Wiegert, R.G., 1987. Optimal age and size at maturity in annuals and perennials with determinate growth. Evolutionary Ecology, 1:231-244.

[36] Kramer, P.J. y Boyer, J.S., 1995. Water relations of plants and soils. Academic Press, San Diego, USA.

[37] Le Houérou, H.N., 1989. Classification écoclimatique des zones arides (s.l.) de l'Áfrique du Nord. Ecologia Mediterranea 15: 95-144.

[38] M'Hirit, O., Benzyane, M., Benchekroun, F., El Yousfi, S.M. y Bendaanoun, M., 1998. L'Arganier. Une espèce fruitière à usages multiples. Pierre Mardaga, Sprimont, Belgique.

[39] Markov, T.A., 1994. Contemporary issues in genetics and evolution. Developmental instability: its origins and evolutionary implications., Dordrecht.

[40] Mckenzie, J.A. y Clarke, G.M., 1988. Diazinon resistance, fluctuating asymmetry and fitness in the Australian sheep blowfly Lucilia cuprina. Genetics 120 213-220.

[41] Mellado, J., 1989. S.O.S. Souss: Argan forest destruction in Morocco. Oryx, 23:87-93.

[42] Møller, A.P. y Swaddle, J.P., 1997. Asymmetry, developmental stability, and evolution. Oxford University Press., Oxford.

[43] Nevo, E., 1998 Molecular evolution and ecological stress at global, regional and local scales: the Israeli perspective. Journal of Experimental Zoology, 282:95-119.

[44] Niklas, K.J., 1992. Plant biomechanics. An engineering approach to plant form and function. The University of Chicago Press. Chicago and London.

[45] Niklas, K.J. y Buchman, S.L., 1994. The allometry of Saguaro height. American Journal of Botany 8:1161-1168.

[46] Palmer, A.R., 1994. Fluctuating asymmetry analyses: a primer. In: T.A. Markow (Editor), Developmental Instability: its origins and evolutionary implications. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 335-364.

[47] Palmer, A.R. y Strobeck, C., Guerrero J., 1986. Fluctuating asymmetry: measurement, analysis, patterns. Annual Review of Ecology and Systematics, 17:391-421.

[48] Peñuelas, J., Gordon, C., Llorens, L., Nielsen, T., Tietema, A., Beier, C., Bruna, P., Emmett, B., Estiarte, M. y Gorissen, A., 2004. Nonintrusive field experimets show different plant responses to warming and drought among sites, seasons, and species in a north-south European gradient. Ecosystems, 7:598-612.

[49] Polak, M., 2003. Developmental instability. Causes and consequences. Oxford University Press Inc, New York, USA, 459 p.

[50] Prigogine, I., 1997. The end of certainty: time, chaos and the new law of nature. The Free Press, New York, 228 p.

[51] Roff, D.A., 1986. Predicting body size with life history models. Bioscience, 365:316-323.

[52] Soulé, M.E. y Cuzin-Roudy, J., 1982. Allomeric variation. 2. Developmental instability of extreme phenotypes. American Naturalist 120: 765- 786.

[53] Sultan, S.E. y Bazzaz, F.A., 1993. Phenotyoic plasticity in *Polygonum persicaria* II. Norms of reaction to soil moisture and the maintenance of genetic diversity. Evolutionary Ecology, 47:1032-1049.

[54] Waddington, C.H., 1942. Canalization and development and the inheritance of acquired characterisitcs. Nature, 150:563-555.

[55] Younis, M.E., El Shahaby, O.A., Hasaneen, M.N.A. y Gaber, A.M., 1993. Plant growth, metabolism and adaptation in relation to stress conditions: XVII. Influence of different water treatments on stomatal apparatus, pigments and photosynthetic capacity in *Vicia faba*. Journal of Arid Environments, 25:221-232.

Rev. Real Academia de Ciencias. Zaragoza. **64:** 51–63, (2009).

Dos enfoques de la Ciencia: Sectorial y Sistémico*

Mario Bunge

Department of Philosophy

McGill University, Montréal, Quebec H3A 2K6, Canada

Vivir es enfrentar y resolver problemas. Y toda vez que abordamos un problema adoptamos un punto de vista o enfoque general. O sea, nos basamos sobre alguna visión general y emprendemos una averiguación usando algún método. Si fallara uno de estos componentes, ya sea la visión general o el método, no lograríamos siquiera plantear el problema de manera inteligible.

Por ejemplo, un ingeniero o un administrador de empresa no logrará descubrir sus problemas, ni menos aun resolverlos, si, siguiendo a Husserl, hace de cuenta que el mundo no existe de por sí, piensa solamente en sí mismo, y confia más en su intuición que en la observación y el cálculo. En lo que sigue sugeriré que el enfoque más promisorio de cualquier problema, sea teórico o práctico, consiste en la concepción sistémica unida con el método científico. La primera ayuda a identificar y plantear problemas, y el segundo a resolverlos.

La concepción sistémica consiste en suponer que los objetos en cuestión, lejos de ser simples o de estar aislados, son sistemas o partes de sistemas. A su vez, un sistema es un objeto complejo que tiene propiedades globales y se comporta como un todo debido a que sus componentes están unidos entre sí.

Acaso la manera más persuasiva de defender la necesidad de adoptar el enfoque sistémico sea exhibir las deficiencias de su opuesto, el enfoque sectorial. Consideremos tres ejemplos de éste: el mito del gene egoísta, el Puente del Milenio, y el economicismo. El mito del gene egoísta, imaginado por el exitoso periodista científico Richard Dawkins, consiste en que somos nuestros genomas. Este mito supone que la molécula de DNA se replica por sí misma, lo que es falso, porque es un ente bastante inerte al que dividide la acción de una enzyma. También supone que la existencia misma del organismo es paradójica, puesto que el organismo no sería sino el vehículo del que se valen los genes para propagarse; también esto es falso, porque los que se adaptan y son seleccionados por el ambiente no son genes sino organismos. El mito en cuestión también supone que el

*Conferencia impartida el 27 de mayo de 2009 en el Aula Magna de la Facultad de Ciencias

ambiente no es mofificado por el organismo, lo que también es falso, como, lo muestran por ejemplo, los hormigueros y la enorme cantidad de tierra que pasa por el intestino de una lombriz. En resumen, el mito del gene solitario es contradicho por la bioquímica, la biología y la ecología.

Segundo ejemplo: el elegante Puente del Milenio, inaugurado en el año 2.000, fue diseñado por Lord Norman Foster, el ingeniero más innovador del siglo XX. Al cortarse la cinta ceremonial, la muchedumbre se precipitó sobre el puente, el que empezó a oscilar horizontalmente. Cuando el puente se movía a la derecha, el transeúnte se inclinaba a la izquierda para no caerse. Pero de esta manera ejercía sobre el piso una fuerza que contribuía a que el puente se desplazase a la derecha. La amplitud de las oscilaciones fue tal, que la gente tuvo que regresar a tierra como pudo. ¿A qué se debió este fracaso, el primero en la brillante carrera de Lod Foster? A que éste olvidó el factor humano en sus ecuaciones: olvidó que los puentes se diseñan y construyen para ser usados por personas, las que no son pesos muertos. Un cálculo reciente (Strogatz et al. 2005) muestra cómo incluir la reacción humana en las ecuaciones de movimiento del puente. Las ecuaciones corrrectas son tan sencillas que están al alcance de cualquier estudiante de ingeniería.

Mi tercer y último ejemplo de pensamiento sectorial es el economicismo, sea de izquierda como el de Karl Marx, o de derecha como el de Gary Becker y los demás entusiastas de las teorías de elección racional. En todas sus versiones, el economicismo postula que la actividad económica es primaria, y todo lo demás es secundario. La realidad muestra que esto es falso: que el ambiente natural, la política y la cultura son tan importantes como la economía. Por ejemplo, una calamidad natural puede destruir una ciudad; una agresión bélica puede arruinar tanto al agredido como al agresor; y una invención científica o técnica puede iniciar una nueva era. En otras palabras, la sociedad debe entenderse como un sistema constituído por cuatro subsistemas: biológico, económico, político y cultural. Además, en la vida real los intereses materials se combinan con los sentimientos morales. Por ejemplo, los egoistas totales, aunque los hay, son una minoría (v. Gintis et al. 2005).

Volvamos ahora a consideraciones generales sobre sistemas. Los hay de varias clases: físicos, tales como átomos y rayos láser; químicos, tales como pilas eléctricas y pilas de compost; biológicos, tales como células y ecosistemas; sociales, tales como familias y empresas; técnicos, tales como ordenadores y fábricas; conceptuales, tales como clasificaciones y teorías; y semióticos, tales como textos y partituras musicales.

Un sistema no es un individuo elemental ni una colección carente de estructura. Los quarks, electrones y fotones son elementales, no compuestos. Y las dunas, los basurales y las muchedumbres son conglomerados pero no sistemas, porque carecen de estructura. Pero tanto los sistemas como los individuos elementales y los conglomerados están inmersos en algún entorno. (Excepción: el universo.)

Hasta aquí hemos señalado tres características de un sistema: su composición, o conjunto de sus partes; su entorno, o conjunto de los objetos con los que está relacionado; y su estructura, o conjunto de los vínculos entre las partes y entre éstas y aquellos componentes de su entorno que lo afectan o que son afectados por el sistema. O sea, hemos identificado tres aspectos de un sistema: su composición, entorno y estructura. Esto basta para caracterizar un sistema estático.

Pero sólo los sistemas conceptuales y semióticos son estáticos: todos los demás cambian. En este caso debemos agregar una cuarta característica: el mecanismo peculiar que mantiene o transforma al sistema. Ejemplos de mecanismo: la fusión nuclear en una estrella, la fermentación en una cuba de vino, el metabolismo en una célula, el trabajo en una empresa, el aprendizaje en una escuela, y el flujo de información en una red de comunicación.

En resumen, el modelo más simple de un sistema s es la cuaterna ordenada

$$\mu(s) = \langle C(s), E(s), S(s), M(s) \rangle,$$

donde $M(s) = \emptyset$ para los sistemas conceptuales y semióticos.

Este modelo es cualitativo. En las ciencias y técnicas se necesitan también modelos cuantitativos, ya que ellas estudian cosas concretas o materiales, todas las cuales poseen propiedades cuantitativas, tales como numerosidad, energía, y edad. Por ejemplo, un ecosistema compuesto por una poblacion de depredadores, tales como zorros, y otra de presas, tales como liebres, se describe en forma aproximada mediante un par de ecuaciones de Lotka-Volterra. Estas describen cómo, al aumentar una de las poblaciones, disminuye la otra. Este proceso se representa mediante una curva o trayectoria cerrada en el espacio de los estados posibles del sistema, espacio cartesiano cuyas coordenadas son las poblaciones de los animales en cuestión.

Todas las ciencias utilizan espacios de estados. Por ejemplo, en termostática se usa el espacio abstracto presión-volumen-temperatura; en mecánica cuántica, espacios de Hilbert; y en microeconomía, espacios precio-cantidad.

Lo que antecede es bien sabido por científicos y técnicos, pero ignorado por la enorme mayoria de los filósofos, al punto que ningún diccionario filosófico, salvo el mío, dilucida los términos 'sistema', 'mecanismo', 'estado', 'espacio de estados', 'enfoque sistémico' y 'sistemismo'. Esto muestra que la filosofía sigue yendo a la zaga de la ciencia y de la técnica. Esto explica también por qué la enorme mayoría de los filósofos son, ya individualistas, ya globalistas (u holistas), antes que sistemistas. También explica por qué hoy día ni científicos ni técnicos leen a filósofos.

Los individualistas ponen atención a los componentes de los sistemas, pero pasan por

alto su estructura. Los globalistas subrayan, con razón, la importancia de las totalidades y el hecho de que éstas poseen propiedades (emergentes) de las que carecen sus componentes; pero niegan la posibilidad de explicarlas exhibiendo estructura y mecanismo: son irracionalistas.

En términos metafóricos, los individualistas ven los árboles pero se les escapa el bosque como unidad de nivel superior, y que posee propiedades, tales como biodiversidad, que no poseen los árboles. En cambio, los globalistas ven el bosque pero no los árboles. Los ecólogos, guardas forestales y administradores ven tanto la totalidad como su composición y las propiedades sistémicas del bosque, tales como su contribución al suelo y a la atmósfera.

Con los sistemas de otros tipos sucede algo similar. Por ejemplo, el zoólogo estudia tanto las características globales de los animales (hábitat, edad, dieta, modo de reproducción, etc.), como sus partes (órganos, células, etc.); el lingista se interesa tanto por la sintaxis y el significado de un texto como por las palabras que lo componen; y el sociólogo se ocupa tanto de las organizaciones como de las personas que las constituyen y transforman.

Todo esto es archisabido, pero no desde siempre. En efecto, el concepto de sistema nace recién durante la Revolución Científica del siglo XVII. Uno de sus pioneros es William Harvey, quien postuló que el corazón, las arterias y las venas constituyen un sistema, el cardiovascular. Esto le permitió explicar el rol del corazón y el hecho, antes misterioso, que el pulso que tomamos en la muñeca es un indicador de las contracciones de ese músculo.

Tres siglos después, el enfoque sistémico se usó para buscar las causas de las enfermedades cardiovasculares. O sea, el paciente fue estudiado como un biosistema ubicado en un sistema social, como lo venía enseñando la sociología médica. En particular, el famoso Estudio Framingham del Corazón, comenzado en 1948 y que sigue en pie, investiga tanto los factores de riesgo exógenos como los endógenos: alto consumo de grasas y de tabaco, hipertensión, y estrés.

El descubrimiento del sistema cardiovascular puede resumirse así en términos de nuestro modelo CESM: el sistema cardiovascular s se caracteriza esquemáticamente como sigue:

C(s) = Corazón, arterias, venas, capilares, y sangre.

E(s) = Resto del cuerpo, en particular pulmones y sistema nervioso.

S(s) = Ligaduras anatómicas y relaciones fisiológicas entre los constituyentes de s y entre éstos y el resto del cuerpo, así como el entorno inmediato (natural y social) de éste.

M(s) = Sístole, diástole, y la circulacion de la sangre que resulta de ellas, con el

consiguiente transporte de oxígeno y la combustión resultante.

Los atlas anatómicos antiguos y medievales mostraban casi todos los órganos internos del cuerpo humano, pero desconectados entre sí. Y los textos que los acompañaban exhibían una ignorancia casi total de las funciones de dichos órganos. En particular, los embalsamadores egipcios tenían un conocimiento morfológico detallado de nuestras vísceras, pero no sabían cómo estaban conectadas ni cómo funcionaban. Además, enriquecían sus observaciones con fantasías, tales como la de que la única función del cerebro es segregar mucosidad; éste era el motivo por el cual el cerebro era el único órgano que no conservaban en vasos canópicos. Esta anécdota debiera recordarnos que la observación no basta para conocer la realidad, y que tampoco basta hacer hipótesis: hay que ponerlas a prueba.

Después de Harvey, los anatomistas y fisiólogos descubrieron otros subsistemas del cuerpo humano: esqueleto-muscular, digestivo, nervioso, endocrino, e inmunitario. Más aun, se descubrió eventualmente que todos estos subsistemas interactúan entre sí. Por ejemplo, la hiperactividad endocrina causa "nerviosidad", el desarreglo del hipotálamo causa bulimia, y los transtomos afectivos afectan al crecimiento de tumores cancerosos.

Estos y otros descubrimientos impulsaron la fusión de disciplinas que antes se cultivaban separadamente. Una de ellas es la psico-neuro-endocrino-inmuno-farmacología. Esta interdisciplina se ocupa, entre otras cosas, de investigar los efectos mentales de los transtomos endocrinos, así como de diseñar terapias para tratarlos.

El enfoque sistémico no se limita a organismos, sino que sugirió los conceptos clave de la ecología, la genética de poblaciones y la biología evolutiva, a saber, los de población, comunidad, ecosistema, evolución, capacidad portante y biodiversidad. En particular, los conceptos de especiación y extinción se refieren tanto a biopoblaciones como a los individuos que las componen. Y, puesto que las novedades evolutivas emergen en el curso del desarrollo individual, se impone la fusión de las dos disciplinas en cuestión: la biología evolutiva y la biología del desarrollo (que incluye a la embriología). Esta síntesis ha sido bautizada "evo-devo". Su emergencia reciente es un triunfo más del sistemismo, ya que éste invita a transgredir fronteras disciplinarias. (Más sobre biofilosofía en Mahner y Bunge 2000.)

Pero regresemos a la ecología. Las comunidades y los ecosistemas poseen propiedades emergentes, tales como la biodiversidad y la sustentabilidad (*sustainability*). Éstas no son propiedades biológicas sino supraorganísmicas. Emergen de las interacciones entre organismos, así como entre éstos y su entorno. Lo mismo vale para las hipótesis ecológicas. Por ejemplo, hasta hace poco se creía que la sustentabilidad de un ecosistema aumenta con su biodiversidad. La verdad es que hay un valor óptimo de la biodiversidad a partir del cual la sustentabilidad disminuye. Recientemente se ha encontrado también que la bio-

diversidad favorece a la especiación. En resumen, la ecología es eminentemente sistémica (v. Looijen 2000).

Lo que vale para la ecología también vale, *mutatis mutandis*, para la técnica correspondiente, o sea, la gestión de bio-recursos, tales como bosques y bancos de peces. La gestión de un recurso renovable es racional solamente si la cuota de explotación es menor que la tasa neta de reproducción. Semejante gestión supone tanto censos periódicos de las biopoblaciones en cuestión como vigilancia estricta del cumplimiento de la cuota. La reciente crisis del bacalao se debió a que el gobierno canadiense sobreestimó la cuota de pesca, y a que las flotas pesqueras no respetaron siquiera esa cuota excesiva, con lo cual ellas mismas terminaron perjudicándose.

La moraleja es obvia: el mercado desbocado es suicida. Para proteger tanto el ambiente como las industrias que lo explotan es necesario elaborar y cumplir normas reguladoras que se ajusten a los conocimierntos pertinentes. En resumen, la acción racional es el último eslabón de la cadena Ciencia -Técnica -Acción. De aquí, dicho sea de paso, la importancia de rechazar las filosofías y seudofilosofías anticientíficas, tales como el intuicionismo, la fenomenología, el existencialismo y el constructivismo-relativismo. Todas estas doctrinas, al negar la realidad del mundo exterior, también niegan la posibilidad de obtener verdades de hecho, y por lo tanto obstaculizan la búsqueda de las mismas (v. Bunge 2006).

Los problemas de la gestión de recursos naturales son eminentemente sistémicos porque abarcan a todo el planeta, a todos nosotros y a nuestros sistemas sociales, desde la familia hasta la comunidad internacional. Para resolver estos problema se requiere la colaboración de muchas disciplinas: ecología, demografía, epidemiología, sociología, macroeconomía, management, politología, etc.

El más peliagudo de estos problemas es el de la gestión de los recursos comunes a toda una comunidad, desde el municipio y el distrito (p. ej., lagunas y bosques) hasta la comunidad internacional (p. ej., mares y la atmósfera). En un artículo famoso, Garrett Hardin (1958) sostuvo que el problema de la gestión de la propiedad común (*the commons*) es insoluble, tanto por la vía privada (mercado) como por la vía pública (Estado), ya que el propietario tiende a sobreexplotar, y el Estado a oprimir. Hardin fue muy criticado, pero se admite generalmente que aun no ha sido refutado.

Otros opinan que el problema de la gestión del bien común ya ha empezado a ser resuelto, porque se ha recurrido a medios distintos de los contemplados por Hardin, a saber, acuerdos internacionales y organizaciones locales (Dietz, Ostrom y Stern 2003). He aquí dos ejemplos. El Protocolo de Montréal (1987), de protección de la capa de ozono, se cumple con bastante éxito, porque las compañias químicas, bajo presión internacional, han buscado y encontrado sustitutos de los clorofluorcarbonos.

Un éxito local notable ha sido la regulación de la pesca de la langosta en el estado norteamericano de Maine, con la participación de los pescadores. Éste no es el único caso de autogestión a nivel local: hay cerca de medio millón de ONGs empeñadas en gestionar recursos de diversos tipos en beneficio de todos. Ésta es la alternativa popular a la disyuntiva Mercado-Estado.

En los dos casos citados la cooperación triunfó sobre la competencia, refutando así el dogma central de la microeconomía neoclásica, que sólo ve un lado de la moneda. Hay consenso en que el problema de la contaminación con CO_2, que está sobrecalentando la atmósfera y causando enormes tormentas, podría resolverse si los EE.UU. firmarsen el Acuerdo de Kyoto, y si China y Rusia lo cumpliesen. En definitiva, la gestión ambiental científica es posible, pero a veces es frustrada por empresarios miopes y sus lacayos políticos.

Regresemos momentáneamente a la relación entre organismos y las totalidades compuestas de organismos, pero que no son seres vivos. Estas totalidades son de cuatro tipos básicos: taxón, población, comunidad y ecosistema. Los taxones, tales como las especies y los géneros, son colecciones de individuos que comparten ciertas propiedades esenciales, como las de tener sangre caliente y antecesores comunes. (Sin embargo, casi todos los biofilósofos sostienen que las especies son individuos: en mi opinión, confunden la relación lógica de pertenencia de individuo a especie con la relacion ontológica de parte a todo.)

Puesto que los taxones son colecciones, y no cosas concretas, en particular entes vivos, no satisfacen leyes biológicas. Es verdad que hablamos del origen de las especies, pero con esto se quiere decir origen o emergencia de organismos individuales de una clase nueva. En otras palabras, no hay evolución de las especies sino cambios cumulativos en el curso del desarrollo individual, debidos a la acción conjunta de saltos génicos y presiones ambientales, que terminan podr abarcar a toda una población. Las leyes biológicas se refieren a organismos individuales, mientras que las leyes ecológicas se refieren a poblaciones y ecosistemas. Véase la Figura 1.

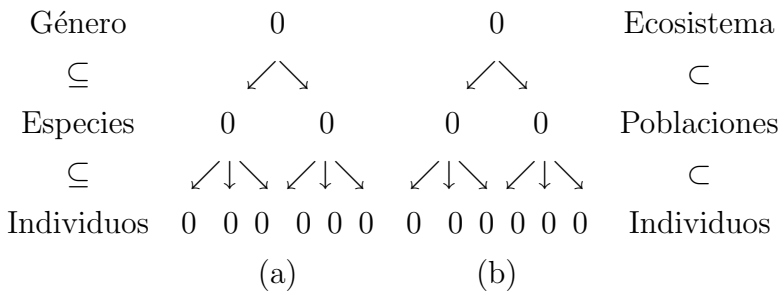

Figura 1.— (a) relaciones lógicas: pertenencia e inclusión. (b) Relación ontológica: parte a todo.

Saltemos ahora del organismo y el ecosistema al universo. Antes de la época moderna,

el universo había sido visto casi siempre como consistente en nuestro planeta cubierto por un conglomerado de "cuerpos celestes". Recién Galileo habla del *sistema solar*, así como de los dos "sistemas del mundo", o modelos de dicho sistema, el antiguo o geocéntrico y el moderno o heliocéntrico. Pero sólo Newton, una generación después, suplió el cemento que mantiene unidos a nuestra estrella con sus planetas y a éstos con sus lunas, a saber, la gravitación. La concepción newtoniana del universo fue la primera cosmovisión científica.

Una vez concebido el sistema solar, se comprobó su existencia calculando órbitas planetarias, prediciendo la existencia de nuevos planetas, y contrastando cálculos con observaciones. (En el curso de la última década se descubrieron un centenar de sistemas planetarios extrasolares.) En cuanto se concibe o se observa un sistema solar, una galaxia, o cualquier otro sistema material, cabe plantearse problemas sistémicos o globales, tales como los de su movimiento como un todo, su estabilidad, su origen y su futuro.

La estabilidad en cuestión es de dos tipos: mecánica y nuclear. Henri Poincaré demostró hace un siglo que nuestro sistema solar es dinámicamente estable, o sea, que sobreviviría a un impacto de un meteorito. Pero Poincaré, no podía saber que nuestro sistema solar tiene los eones contados, porque el Sol terminará por implotar debido a su consumo de combustible nuclear. Tanto la estabilidad dinámica como la inestabilidad nuclear del sistema solar se determinan analizando los componentes pertinentes y sus interacciones. Esto confirma la tesis del emergentismo racionalista, según la cual la emergencia y la sumersión de cualidades no son misteriosas sino explicables mediante el análisis científico de los sistemas en cuestión. Al mismo tiempo, queda refutada la opinión de los filósofos intuicionistas, tales como Bergson y Husserl, acerca de la limitación de la razón. La ciencia nunca completará la exploración de la realidad, pero la filosofía irracionalista no hace sino descorazonarla.

Finalmente, pasemos de los sistemas naturales a los artificiales. Estos últimos son de dos clases: técnicos, como las máquinas, y sociales, como las empresas. Los sistemas técnicos, o artefactos, difieren de los naturales en que son materializaciones de ideas (diseños). Pero, desde luego, se ajustan a leyes naturales. De aquí que las ingenierías se basen sobre las ciencias naturales.

También los sistemas sociales son de factura humana, pero algunos de ellos, tales como las familias y las bandas primitivas, han emergido espontáneamente, en tanto que otros, como los bancos y las escuelas, han sido diseñados. Además, aunque los sistemas sociales no pueden violar leyes naturales, satisfacen normas o convenciones que, sin ser arbitrarias, tampoco derivan de leyes naturales. Por ejemplo, la biología no enseña que debamos ser igualitarios ni elitistas, democráticos ni autoritarios, ilustrados ni oscurantistas. Sólo las ciencias sociales pueden convalidar o invalidar a las ideologías. Por ejemplo, la psicología social muestra que la gente es más feliz allí donde las desigualdades económicas son

menores, aun cuando el nivel de ingreso sea menor.

Las normas o convenciones sociales son invenciones, y su validez o invalidez se pone a prueba en la acción social, no en el laboratorio. Su vigencia, como su violación, depende de intereses y de opiniones más que de la razón o el experimento. De aquí la falsedad de la sociobiología y de la psicología evolutiva actual, las que pretenden deducir las ciencias sociales y la ética de la biología.

Algo similar ocurre con las teorías de la elección racional, tales como la microeconomía neoclásica y las que la imitan. Las gentes de carne y hueso rara vez se comportan como agentes libres, calculadores y sociópatas. La mayoría somos esclavos de costumbres y de sistemas sociales. Más aún, solemos tomar decisiones de manera impulsiva o sobre la base de cálculos falsos. Esto lo han confirmado psicoeconomistas experimentales tales como Daniel Kahneman. Y un experimento psico-politológico reciente ha mostrado que el votante norteamericano suele juzgar la competencia de los candidatos por sus caras. La racionalidad, aunque siempre deseable, no es tan común como creía Aristóteles.

Otro defecto capital de las teorías de la elección racional es que ignoran la existencia de sistemas sociales, pese a que cada uno de nosotros, incluso el más recluso de los ermitaños, es parte de varios sistemas sociales, y por lo tanto está sujeto a las normas que los rigen.

Los antropólogos enseñan que las sociedades primitivas (o prístinas) son sistemas cuya estructura central es el conjunto de relaciones de parentesco, algunas de las cuales son biológicas y otras convencionales. En la sociedad moderna, en cambio, predominan las relaciones no biológicas: las económicas, políticas y culturales. Fuera de la familia no hay tu tía.

En otras palabras, la sociedad moderna es un supersistema constituido por subsistemas de cuatro tipos: biopsíquicos (familia, círculo de amigos, sociedad de asistencia mutua, club), económicos (empresa, cooperativa), culturales (escuela, biblioteca pública, congregación religiosa), y políticos (Estado, partido político, sindicato, asociación patronal, sociedad de fomento).

Estos sistemas o círculos sociales se solapan parcialmente entre sí, porque toda persona normal forma parte de varios susbsistemas. Se es hijo o progenitor, empleado o empleador, televidente (a veces incluso lector) y votante (o al menos contribuyente). Además, hay sistemas mixtos. Por ejemplo, desde su origen hace cinco milenios, los Estados son no sólo órganos políticos, sino también empresas económicas y culturales, como lo son las editoriales y ciertas iglesias.

La visión sistémica de la sociedad fue anticipada por Ibn Jaldún, el gran sociólogo tunecino de fines del siglo XIV. La misma concepción fue formulada y usada explícitamente cuatro siglos después por el Barón de Holbach, colaborador insigne de la enciclopedia

dirigida por d'Alembert y Diderot. Holbach fue el fundador del sistemismo filosófico, con sus obras *Système de la nature* (1770) y *Système social* (1773). Fue muy influyente en su tiempo, pero hoy se le ignora sistemáticamente en las facultades de humanidades del mundo entero.

La visión sistémica de la sociedad es la alternativa a las dos visiones más difundidas: el globalismo (holismo) y el individualismo (atomismo). La tabla siguiente da una idea esquemática de las tres visiones en pugna.

Individualismo	Globalismo	Sistemismo
Individuo	Sociedad	Individuo en sociedad
Acción	Estructura	Acción en sociedad
Valores individuales	Valores colectivos	Valores individuales y colectivos
Derechos	Deberes	Derechos y deberes
Libertad	Orden	Libertad responsable
Iniciativa	Obediencia	Participación
Mercado	Estado	Mercado regulado
Democracia política	Totalitarismo	Democracia integral
Felicidad	Sacrificio	Bienestar y servicio
Egoismo	Altruismo	Egotuismo

El individualismo, o atomismo, fue resumido por Margaret Thatcher: "La sociedad no existe: sólo hay individuos". Y los nazis resumieron su propia doctrina colectivista (para las masas, no para los jerarcas) en su consigna escalofriante: "Tú nada eres. Tu nación [Volk] lo es todo". Por su parte, el sistemismo sostiene que cada "nosotros" (familia, círculo de amigos, congregación religiosa, asociación profesional, empresa, gobierno, o lo que fuere) es más que la colección formada por tú, yo, y ellos: todos juntos constituimos un sistema social caracterizado por propiedades suprapersonales, tales como numerosidad y distribución de ingresos, cohesión y conflicto, tradición y orden político, división del trabajo y estratificación social, nivel económico y nivel cultural.

En cierto modo, el sistemismo reune las tesis válidas de sus rivales. En efecto, aunque concuerda con la tesis individualista de que no hay hecho social sin acción individual, el sistemismo también acepta la tesis colectivista o globalista de que los individuos se agrupan en sistemas que poseen propiedades sistémicas o emergentes, tales como viabilidad, estructura social, y orden jurídico. En otras palabras, el sistemismo admite los niveles de sus rivales: el microsocial de los individualistas y el macrosocial de los holistas. Más aún, afirma que lo macrosocial emerge de procesos microsociales, a los que a su vez condiciona:

Nivel macrosocial (instituciones)

Apoyo o rebelión ↑ ↓ Asistencia o control

Nivel microsoocial (individuos)

Veamos ahora cómo contribuye el enfoque sistémico a entender dos problemas sociales sobresalientes en los países latinoamericanos: la marginalidad y el subdesarrollo. La primera es una propiedad de individuos en sociedad, mientras que la segunda es una propiedad colectiva de ciertas sociedades.

La marginalidad consiste en la exclusión de algunos sistemas sociales. Por ejemplo, los desocupados son marginados económicos, y los analfabetos son marginados culturales. O sea, la marginalidad es el dual de la pertenencia o participación. Por lo tanto, la marginalidad se combate facilitando la participación: la incorporación en una empresa o cooperativa, el ingreso en una escuela, la afiliación voluntaria a un sindicato o partido político, etc. Una manera eficaz de lograr semejantes inclusiones sin coacción es mediante las ONGs. Otra es invertir los impuestos a los réditos en obras públicas, así como en salud y educación. Esta combinación de acciones micro a macro con las inversas evita tanto los excesos del totalitarismo como las carencias del neoliberalismo. Cuando se tiende a la participación integral se marcha hacia la democracia integral: biológica, económica, cultural y política. A ella se aproximan los paises escandinavos, en tanto que los latinoamericanos son los más alejados de este ideal, como lo sugiere el que son los que poseen el mayor índice de Gini de desigualdad de ingresos (Galbraith y Berner 2001).

El esquema que sigue resume lo que acabo de escribir.

Equidad	Inequidad
↓	↓
Participación	Marginalidad
↓	↓
Cohesión	Fragmentación
↓	↓
Democracia	Dictadura
↓	↓
Estabilidad	Inestabilidad

El subdesarrollo se caracteriza por la marginalidad y la dependencia, así como por sus concomitantes: privilegio, violencia, corrupción, e impunidad. Si se adopta la concepción sistémica de la sociedad, se debe admitir que el subdesarrollo auténtico es multilateral, por lo cual no puede haber una receta simple, tal como el libre comercio, la democracia politica, o la educación popular, para superarlo (Bunge 1995b). Los problemas sistémicos exigen soluciones sistémicas, no sectoriales, como lo ha reconocido incluso George Soros.

Más aún, cualquier programa realista de desarrollo de un país tendrá que adaptarse a los recursos naturales y humanos del país, así como a sus tradiciones y a las aspiraciones de su pueblo. No hay recetas internacionales, sectoriales y simples para lograr en pocos años lo que a los paises desarrollados les costó varios siglos.

Esto es lo que intenté, infructuosamente, comunicar a los economistas ecuatorianos encargados del desarrollo cuando fui a Quito en 1979, en misión del PNUD. Desde entonces creo que los economistas ortodoxos son los peores obstáculos al desarrollo auténtico, que es integral, no sólo económico. (Dicho sea de paso, el fundador de la CEPAL, Raúl Prebisch, fue un economista heterodoxo.)

La visión sistémica, y en particular el esquema cuatripartito de la sociedad, constituye el fundamento de la politica de desarrollo integral, o sea, biopsíquico-económico-político-cultural. Esta concepción sistémica del desarrollo contrasta con las conocidas visiones sectoriales: ambientalismo (defensa del entorno natural), biologismo (salud), economismo (producción e intercambio), culturalismo (producción y difusión de bienes culturales), y politicismo (democracia y servicio público). El partidario del desarrollo integral adopta al mismo tiempo estas cinco visiones parciales, porque sabe que no puede haber una sociedad sostenible sin acceso a recursos naturales, ni una economía que provea las necesidades básicas, ni una cultura que satisfaga la curiosidad y la creatividad, ni una organización política que garantice la seguridad, la participación y la paz, así como el cumplimiento de los derechos y deberes inherentes a una convivencia civilizada.

En mi primera visita a Quito, en 1962, presencié una gran marcha de indios, todos vestidos de negro, que clamaban textualmente contra el feudalismo heredado de la colonia. A ellos no les había llegado los beneficios del voto, del tribunal, ni de la universidad. Vivían al margen de la modernidad, mientras que la elite del país gozaba de los beneficios de ella. Esta situación no ha cambiado para el 80 % de la humanidad, ni siquiera allí donde los ciudadanos tienen el derecho de elegir periódicamente a los mandatarios y parlamentarios que les traicionarán. El voto libre es necesario pero no basta: también hay que tener los conocimientos y la holgura económica que permitan votar bien y sin miedo. Igualmente, no basta el mercado: para aprovecharlo, hay que tener ingresos y es menester regularlo para proteger la salud y la bolsa del consumidor.

En resumen, el universo es el sistema de todos los sistemas. Por este motivo, sólo se lo puede entender y controlar eficazmente si se adopta un enfoque sistémico combinado con el método científico. Sin embargo, estos ingredientes no bastan: para resolver cualquier problema que no sea de rutina también hace falta pasión. Se necesita pasión intelectual, afán por entender, en el caso de problemas intelectuales. Y hace falta pasión moral, afán por hacer el bien, en el caso de problemas sociales. La pasión política, que anima a la acción politica, debiera estar al servicio de la pasión moral. Cuando no lo está, la política

es esclava de intereses particulares, no del bien público.

En resumen, la fórmula que propongo para enfrentar los trágicos problemas sociales contemporáneos, en particular los del tercer mundo, es:

Eficiencia = Sistemismo + Cientificismo + Moral.

Referencias

[1] Bunge, Mario. 1979. *Treatise on Basic Philosophy*, vol. 4: A World of Systems. Dordrecht: Reidel.

[2] Bunge, Mario. 1995a *Sistemas sociales y filosofía.* Buenos Aires: Sudamericana.

[3] Bunge, Mario. 1995b. *Ciencia, técnica y desarrollo.* Buenos Aires: Sudamericana.

[4] Bunge, Mario. 1999. *Las ciencias sociales en discusión.* Buenos Aires: Sudamericana.

[5] Bunge, Mario. 2004. *Emergencia y convergencia.* Barcelona: Gedisa.

[6] Bunge, Mario. 2006. *A la caza de la realidad.* Barcelona: Gedisa.

[7] Dietz, Thomas, Elinor Ostrom, y Paul C. Stern. 2003. The struggle to govern the commons. *Science* **302**: 1907-12.

[8] Galbraith, James K., y Maureen Berner. 2001. *Inequalty & Industrial Change: A Global View.* Cambridge: Cambridge University Press.

[9] Gintis, Herbert, Samuel Bowles, Robert Boyd y Ernst Fehr, compils. 2005. *Moral Sentiments and Material Interests.* Cambridge, MA: MIT Press.

[10] Hardin, Garrett. 1958. The tragedy of the commons. *Science* **162**: 1243-7.

[11] Looijen, Rick C. 2000. *Holism and Reductionism in Biologyand Ecology.* Dordrechl: Kluwer Academic.

[12] Mahner, Martin, y Mario Bunge. 2000. *Fundamentos de la Biofilosofía.* México D.F: Siglo Veintiuno.

[13] Strogatz, Steven H., Daniel M. Abrams, Allan McRobie, Bruno Eckhardt, y Edward On. 2005. Crowd psychology on the Millennium Bridge. *Nature* **438**: 43-45.

Rev. Real Academia de Ciencias. Zaragoza. **64:** 65–105, (2009).

Vigencia y actualidad de la teoría de la evolución: reflexiones en el bicentenario de Darwin

José Adolfo de Azcárraga*

Depto. de Física Teórica

Universidad de Valencia e IFIC (CSIC-UVEG)

Resumen

Tras introducir las ideas de Darwin y algunos de los hechos que sustentan el actual paradigma evolutivo, se muestra que la teoría de la evolución resulta imprescindible para comprender mejor nuestra naturaleza y nuestro lugar en el conjunto de los seres vivos. Y como toda visión del mundo está inevitablemente teñida por la perspectiva que tenemos de nosotros mismos, hoy no cabe *Weltanschauung* alguna al margen de la teoría de la evolución. Por ello, las ideas que tienen su origen en las de Darwin de hace 150 años tienen hoy más relevancia de la que pudiera parecer, lo que se ilustra con algunos ejemplos actuales. Numerosas notas a pie de página extienden el texto principal o lo amplían con citas originales que, cuando son de especial relevancia, se reproducen en el idioma original.

"Entre todas las facultades de la mente humana, se admitirá,
supongo, que la Razón se encuentra en la cima"
(Charles Darwin, El origen del hombre (1871), cap.III,
'Comparison of the Mental Powers of Man and the Lower Animals')

Incluso para contradecir una razón, hay que dar razones.

1. Introducción

Nada tiene sentido en biología al margen de la evolución, afirmó hace más de medio siglo Theodosius Dobzhanski, una de las figuras —junto con Julian Huxley (*The modern*

*Académico Correspondiente. Texto basado en la conferencia impartida en la Facultad de Ciencias de Zaragoza por el autor, el 22 de enero de 2009, con motivo de su nombramiento como Académico Correspondiente.

synthesis, 1942) y otros— de la *teoría sintética* o *síntesis moderna* de la evolución, que conciliaba las ideas originales de Darwin con los progresos de la genética. Pero en este año 2009, cuando se celebra —sobre todo en Occidente— el bicentenario del nacimiento de Charles Darwin (1809-82) y el sesquicentenario de la publicación (el 22 de noviembre de 1859) de *The Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of favoured Races in the Struggle for Life*, cabe preguntarse por la relevancia actual de una teoría de orígenes tan remotos así como por qué, tantos años después, la evolución sigue despertando recelo e incluso rechazo. Pues, si bien muchas organizaciones científicas y culturales están celebrado 2009 como el 'año de Darwin', no se ha producido ninguna declaración internacional al respecto. Esta omisión resulta especialmente notoria puesto que 2005, centenario del *annus mirabilis* de Einstein, fue declarado Año Mundial de la Física por la UNESCO; en España los físicos celebramos, incluso, una sesión conmemorativa en el Congreso de los Diputados. Sin embargo, el mundo oficial ha preferido en esta ocasión pasar de puntillas sobre la efeméride del hallazgo de uno de los más grandes científicos de la historia: la explicación del origen y la diversidad de las especies que pueblan el planeta.

2. La gran idea de Darwin (y Wallace): la selección natural

No cabe dudar de la validez de las ideas centrales de la teoría de la evolución y, en particular, del proceso de la selección natural, que selecciona de forma acumulativa las variaciones accidentales que se producen en los seres vivos durante muchas generaciones y largos períodos de tiempo, y que genera las distintas especies. Nunca una idea tan simple ha tenido un poder explicativo tan grande[1]; superior, incluso, a la ley newtoniana de la gravitación que rige el sistema solar. La selección natural, la idea central de Darwin y de Alfred Russel Wallace (1823-1913) estuvo inspirada por el *Ensayo sobre la población* (1798) del gran economista de Cambridge Thomas Robert Malthus (1776-1834), que am-

[1] Y la importancia de la selección natural no está limitada a los seres vivos. Aunque sea abandonando por un momento los límites de este ensayo, vale la pena mencionar que la idea de la selección natural ha sido aplicada... ¡al dominio de la física cuántica! El físico de Los Alamos Wojcieh Hubert Zurek, famoso por sus estudios en este campo sobre decoherencia, introdujo en 2002 la noción de *darwinismo cuántico*, que da cuenta de qué estados cuánticos están más adaptados a 'sobrevivir' en su entorno y permite comprender mejor los problemas de la transición del dominio cuántico al clásico en la física, aspectos que la tradicional 'interpretación de Copenhague' de la mecánica cuántica separa cómoda y convenientemente (el físico David Deutsch ha llegado a decir que lo que pretende esa interpretación es, simplemente, "soslayar más fácilmente las implicaciones de la mecánica cuántica sobre la naturaleza de la realidad").

La 'síntesis moderna' de la evolución —en gran parte una teoría genética de la evolución darwiniana— se desarrolló dentro de los primeros decenios del s. XX, paralelamente a la física cuántica. El año que se redescubrieron las leyes de Mendel es también el del nacimiento de esa física: fue en 1900 cuando Max Planck (1858-1947) descubrió la naturaleza cuántica de la radiación e introdujo su famosa constante h.

bos habían leído (Darwin lo hizo en 1838). La selección natural no es una fuerza como la de la gravedad, pero hace la evolución tan obligada como la caída de los graves; no tiene dirección o sentido histórico pues no produce progreso, pero sí adaptación al medio (Wallace, no obstante, sí creyó en una 'tendencia a la progresión' de las especies). La evolución es, pues, *inevitable, aleatoria* y *no finalista*, aunque esto no significa que cualquier posibilidad esté abierta a la vida: la altura de los árboles —por ejemplo— está limitada por el hecho de que la savia no puede ascender indefinidamente. Las leyes de la física y de la química condicionan las posibilidades accesibles a los seres vivos, cuyas funciones vitales, formas y tamaños no pueden ser completamente arbitrarios. Por ello no cabe sorprenderse ante la aparición de abundantes fenómenos de convergencia, que muestran que las posibilidades están más limitadas de lo que parece. Los ojos, por ejemplo, aparecen en muchas y diferentes cadenas evolutivas: el ojo humano, tipo cámara fotográfica, tiene un parecido asombroso con el ojo de los cefalópodos, aunque ambos evolucionaron independientemente.

Es instructivo recordar cómo se resolvieron dos serias dificultades que presentaba la teoría de la evolución en tiempos de Darwin. La primera, que una ligera variación en algún rasgo de una especie quedaría diluida y desaparecería en pocas generaciones; se le recordaba a Darwin, por ejemplo, que el cruce entre blancos y negros daba lugar a mulatos, no a hijos de uno y otro color. Darwin no podía imaginar mientras se publicaba *El Origen* ("nuestra ignorancia de las leyes de la variación es profunda", decía), que en Moravia el monje agustino Gregor Mendel (1822-1884) estaba experimentando pacientemente en el huerto de su convento con cerca de treinta mil plantas de guisantes (*Pisum sativum*), lo que le llevaría a formular sus famosas leyes sobre la herencia. Hoy se sabe que un organismo no es exactamente una mezcla de sus progenitores, sino la suma de multitud de caracteres individuales, heredados de sus antepasados, que se manifiestan de acuerdo con las leyes de la herencia genética. Pero Mendel publicó sus hallazgos sobre los híbridos (*Versuche über Pflanzenhybriden*, 1866) en la revista de la *Sociedad de Historia Natural de Brünn* (hoy Brno, en Chequia), de escasísima difusión, y no fueron conocidos hasta el cambio de siglo. Se ha discutido mucho sobre si Darwin llegó a tener noticia de ese trabajo, pero todo indica que no: ciertamente no estaba suscrito a esa revista, prácticamente desconocida, y una minuciosa búsqueda entre todos sus documentos ha dado resultados negativos. No es extraño: sólo se han encontrado once citas a Mendel en publicaciones anteriores a 1900, cuando fue redescubierto por el holandés Hugo de Vries (que había encontrado independientemente leyes de hibridación), el alemán Karl Erich Correns, el austríaco Erich Tschermak von Seysenegg y el británico W. Bateson (1861-1926). Éste difundió las ideas de Mendel en el libro *Los principios de la herencia de Mendel: una defensa* (1902) e introdujo, además, buena parte de la terminología del campo, incluyendo el uso actual de

'genética' (del griego $\gamma\varepsilon\nu\nu\acute{\omega}$, dar vida). La aparición de las leyes de Mendel acabó con los críticos que consideraban que la evolución darwiniana era un episodio científico ya concluido y, por tanto, con el 'eclipse de Darwin' que se había iniciado en los últimos años del s. XIX. El mendelismo, por su parte, se había tenido que enfrentar a un aparente problema: parecía que la presencia de los alelos dominantes debía ser más numerosa en cada generación. La ley que hoy se conoce como de Hardy-Weinberg (1908), sin embargo, resolvió la cuestión al explicar el mecanismo del equilibrio genético de una población[2] que, no obstante, se rompe por las mutaciones y la selección. Esa ley es a la genética mendeliana lo que la primera ley de Newton a la mecánica: en ausencia de una fuerza externa (*e.g.*, una mutación), un cuerpo (población) permanece en reposo o en movimiento constante (equilibrio genético).

La segunda dificultad se refería al tiempo necesario para que la evolución tuviera lugar: uno de los críticos de Darwin, el físico William J. Thomson (Lord Kelvin, 1824-1907), consideraba en 1862 que el Sol, que imaginaba como una inmensa caldera de carbón ardiente, "probablemente no había iluminado la Tierra más de cien millones de años y casi seguro no lo había hecho durante más de quinientos". Por lo que se refiere a la Tierra, Thomson estimaba que su edad estaba entre 24 y 400 millones de años[3], cifras insuficientes para el proceso evolutivo. Darwin no podía resolver estas dificultades, hoy fuera de lugar dado el carácter discontinuo de las mutaciones genéticas y el origen termonuclear de la energía solar, que da al Sol una antigüedad de unos 4600 millones de años[4] (4600 Ma). Claro que, a su vez, Darwin podía haber contraatacado afirmando que la validez de su teoría invalidaba el ingenuo modelo solar de Lord Kelvin y preveía unas leyes de la herencia

[2]La ley de Hardy (encontrada también independientemente por W. Weinberg) es, por cierto, la única incursión en la matemática aplicada del gran matemático de teoría de números G.H. Hardy (1877-1947), quien menospreciaba todo lo que no fuera matemática pura. En su carta a *Science*, donde deduce esa ley, afirma con irónica altanería: *"I should have expected the very simple point which I wish to make to have been familiar to biologists"* y, tras ese comentario, obtiene la ley precisando que usará, simplemente, *"a little mathematics of the multiplication-table type"*.

[3]La estimación de Kelvin de la edad de la Tierra, suponiendo que era una esfera caliente que se había ido solidificando, contaba con la oposición de los geólogos, que la juzgaban muchísimo más antigua (hoy se sabe que la Tierra tiene unos 4560 millones de años). A título anecdótico mencionaré que en 1658 el arzobispo anglicano de Armagh (hoy en Irlanda del Norte) James Ussher había determinado, Biblia en mano, que la Creación había tenido lugar el 23 de Octubre de 4004 a.d.J. Kepler y Newton habían atribuido a la Tierra una antigüedad del mismo orden de magnitud.

[4]La edad del sistema solar es muy próxima a la del propio Sol. En unos 5000 Ma, éste se acercará al final de su vida activa y probablemente se tragará a la Tierra al expandirse y transformarse en gigante roja, para después contraerse y acabar su ciclo vital como enana blanca, un proceso típico de estrellas pequeñas-medias como nuestro Sol. No obstante, bastarán unos 1000 Ma para que el progresivo aumento de la temperatura solar evapore toda el agua terrestre y la vida sea imposible.

que preservasen la individualidad de los caracteres heredados, anticipando así las bases de la futura genética mendel-morganiana y obviando las objeciones que el polifacético ingeniero Henry C. Fleeming Jenkin le había hecho en 1867 sobre la mezcla y dilución de las variaciones[5] ya citadas. Por supuesto no fue así; eso hubiera requerido otra época y un Darwin con una personalidad muy diferente. Darwin, científico íntegro hasta el extremo, pero también hombre prudente, era contrario a polemizar sin necesidad. De hecho, el carácter revolucionario de sus ideas pesó sobre él más de una vez, hasta llegar a confesar a un amigo suyo, el botánico J. D. Hooker, que concluir que las especies evolucionaban "era como reconocer un crimen", aunque ello no le desvió de las conclusiones lógicas de su pensamiento[6].

3. Darwin, Lamarck y Lucrecio: azar, necesidad, contingencia y convergencia

Aunque la selección natural juega un papel fundamental en todo el *Origen*, Darwin concluyó la introducción de la primera edición con estas cautas palabras: "estoy convencido de que la Selección Natural ha sido el agente principal, pero no exclusivo, de cambio". Por otra parte, y debido a algunas críticas como las ya mencionadas, Darwin dio en sucesivas ediciones del *Origen* algún peso a las ideas de Jean-Baptiste Lamarck (1744-1829), un importante precursor de la evolución de las especies aunque al margen del mecanismo darwiniano de la selección natural. Lamarck —a quien se debe el término *biología*— había defendido en su *Philosophie Zoologique* (de 1809, el año del nacimiento de Darwin) sus leyes para la evolución: que la necesidad produce nuevos órganos; que éstos alcanzan un desarrollo que es proporcional al grado de uso al que están sometidos y que todas las características adquiridas por un individuo son transmitidas a su progenie. En esencia,

[5]Dice Darwin hacia el final del capítulo IV *('Natural selection'): "nothing can be effected, unless favourable conditions occur, and variation itself is apparently always a very slow process. This process will often be greatly retarded by free intercrossing".*

[6]Darwin era consciente de las muchas implicaciones —religiosas y sociales— de sus ideas para la Gran Bretaña de los inicios de la era victoriana (la Iglesia Anglicana, por ejemplo, condenó la evolución con dureza por falsa, atea, inmoral y materialista, algo que la Iglesia Católica no haría en igual grado). Para poder trabajar en paz, Darwin se aisló socialmente en buena medida; incluso instaló un espejo fuera de la ventana de su estudio para conocer anticipadamente la llegada de visitantes a su casa. Cabe pensar que, de no haber sido un hombre de talante liberal y con completa independencia económica, *a wealthy Whig gentleman*, el entorno hostil a sus ideas no le hubiera permitido concluir su obra.

Se pueden encontrar muestras de la honestidad intelectual de Darwin y de su sencillez en su *Autobiografía*, especialmente en la edición que realizó su nieta, Dora Barlow, en 1958. Ésta restituyó los párrafos de Darwin suprimidos por su hijo Francis, que fue quien preparó la primera edición (1887) tras la muerte de su padre. Francis, inicialmente contrario a ello, acabó omitiendo algunas partes del manuscrito paterno por insistencia de su madre Emma (de soltera Wedgwood, de la familia de las conocidas porcelanas inglesas y prima de Darwin) y de algún otro pariente.

Lamarck defendía la importancia del uso y desuso en la evolución y la idea de que la necesidad acaba creando el órgano requerido[7]. En su vejez, Darwin llegó incluso a pensar en la herencia ocasional de las mutilaciones sistemáticas; no obstante, Darwin mantuvo en conjunto su oposición a la herencia de los caracteres adquiridos.

Darwin ya había manifestado explícitamente su rechazo al lamarquismo antes del *Origen* si bien, decía, "las conclusiones a las que llego no son muy diferentes de las suyas [de Lamarck] aunque el mecanismo del cambio lo es completamente". En una carta de 1844 a Hooker, juzgaba el libro de Lamarck como auténtica basura[8] (*veritable rubbish*). Cabe recordar también, ya en el *Origen*, el claro ejemplo "en contra de la conocida doctrina de

[7]Darwin insertó en el último capítulo 'recapitulación y conclusión' del Origen, en su sexta y última edición (1872), este comentario: *"I have now recapitulated the facts and considerations which have thoroughly convinced me that species have been modified, during a long course of descent. This has been effected chiefly through the natural selection of numerous successive, slight, favourable variations; aided in an important manner by the inherited effects of the use and disuse of parts; and in an unimportant manner, that is, in relation to adaptive structures, whether past or present, by the direct action of external conditions, and by variations which seem to us in our ignorance to arise spontaneously. It appears that I formerly underrated the frequency and value of these latter forms of variation, as leading to permanent modifications of structure independently of natural selection. But as my conclusions have lately been much misrepresented, and it has been stated that I attribute the modification of species exclusively to natural selection, I may be permitted to remark that in the first edition of this work, and subsequently, I placed in a most conspicuous position —namely, at the close of the Introduction— the following words: 'I am convinced that natural selection has been the main but not the exclusive mean of modification'. This has been of no avail. Great is the power of steady misrepresentation; but the history of science shows that fortunately this power does not long endure"*. Darwin reaccionaba así ante las críticas para las que aún no había respuesta; el Darwin más espontáneo, el 'más Darwin', es el de la primera edición del *Origen.*

[8]La carta, fechada el 10 de Noviembre, incluye el párrafo *"facts can be viewed & grouped under the notion of allied species having descended from common stocks. With respect to Books on this subject, I do not know of any systematical ones, except Lamarck's, which is veritable rubbish"*. La carta concluye con este revelador comentario: *"I believe all these absurd views, arise, from no one having, as far as I know, approached the subject on the side of variation under domestication, & having studied all that is known about domestication"*. Darwin mantuvo un estrecho contacto con ganaderos y criadores para conocer detalladamente las consecuencias de la 'selección artificial'.

Ese mismo 1844, el 11 de Enero, Darwin ya había escrito a Hooker: *"I am almost convinced (quite contrary to opinion I started with) that species are not (it is like confessing a murder) immutable. Heaven forfend me from Lamarck nonsense of a 'tendency to progression', 'adaptations from the slow willing of animals' etc,—but the conclusions I am led to are not widely different from his— though the means of change are wholly so"*.

La correspondencia entre Darwin y Hooker es deliciosa. Las cartas citadas tienen los números 789 y 729, respectivamente, en el archivo de la correspondencia de Darwin en la Biblioteca de la Universidad de Cambridge. Darwin mantuvo una copiosísima e interesante correspondencia que prueba su minuciosidad y su afán por contrastar y obtener toda la información posible: se conservan más de catorce mil cartas, entre escritas y recibidas. Afortunadamente (en este aspecto), el *e-mail* no existía entonces.

Lamarck" de las hormigas obreras estériles que Darwin describe al final del capítulo VII dedicado al instinto. Después, en el 'esbozo histórico' que Darwin escribió para dar cuenta de los antecedentes de su teoría, volvió a criticar las ideas lamarquistas que, curiosamente había anticipado su propio abuelo, el Dr. Erasmus Darwin, médico y botánico. Según éstas, las jirafas tendrían el cuello largo *para* poder alcanzar la parte alta de los árboles, habiéndolo adquirido como consecuencia de esforzarse en estirarlo durante su vida para alcanzar el alimento y durante muchas generaciones. Darwin, por supuesto, estaba en lo cierto al criticar la errónea visión de Lamarck: los toros, por ejemplo, no tienen cuernos *para* embestir, sino que embisten *porque* tienen cuernos; la evolución no es finalista.

En una ocasión le preguntaron a Darwin, ya anciano, si había leído a Lucrecio. Darwin respondió que no; pero es seguro que se hubiera deleitado con los versos contra las causas finales con los que Lucrecio (s. I a. de J.) se adelantó a la teoría de la evolución, pulverizando *avant la lettre* la errónea visión de Lamarck. En el libro IV de su *De rerum natura*, versos # 822-857, Lucrecio advertía:

> *"Encarecidamente te prevengo que huyas de un error y lo evites con cuidado: no creas que las claras luces de los ojos fueron creadas para que pudiéramos ver; ni que para avanzar a grandes pasos se articularon muslos y piernas, apoyados en los pies; ni que tenemos antebrazos adaptados a los músculos de los brazos, y manos que nos sirven por ambos lados, a fin de poderlos usar en las necesidades de la vida.*
>
> *Éstas y otras interpretaciones del mismo género trastornan el orden de las cosas y surgen de un razonamiento vicioso; pues nada ha nacido en nuestro cuerpo con el fin de que podamos usarlo: al revés, lo que ha nacido engendra el uso. No existió la visión antes de que nacieran los ojos, ni la palabra antes de ser creada la lengua; más bien el origen de la lengua precedió con mucho al de la palabra, y las orejas fueron creadas mucho antes de que se oyera un sonido, y, en fin, todos los miembros son, a mi parecer, anteriores al uso que de ellos se hace. No pudieron, por tanto, ser creados en vistas a su utilidad [...]".*

Y en el libro V, versos # 837-877, llegó a anticipar la idea de la supervivencia de los más aptos y la selección natural:

"[...] Otros monstruos y portentos [...la Naturaleza] iba creando, pero en vano, pues la Naturaleza les impidió medrar y no pudieron alcanzar la deseada flor de la edad, ni encontrar alimento, ni ayuntarse por las artes de Venus. Vemos, en efecto, que han de concurrir muchas circunstancias para que las cosas puedan reproducirse y propagar su especie; primero debe haber pastos; luego un conducto a través del organismo por donde el semen genital pueda manar de los miembros relajados; y para que la hembra pueda unirse a los machos, deben tener órganos por los que intercambien mutuos goces.

Necesario es que entonces se extinguieran muchas especies de animales y no pudieran, reproduciéndose, forjar nueva prole. Pues todas las que ves nutrirse de las auras vitales, poseen astucia o fuerza o, en fin, agilidad, que han protegido y preservado su especie desde el principio de su existencia. Muchas hay que por su utilidad nos son encomendadas a nosotros, confiadas a nuestra tutela.[...] Pero aquellos a quienes la naturaleza no confió ninguno de estos dones [se refiere a la fuerza, la astucia, y la utilidad para el hombre de canes y bestias de carga]*... sin duda todos quedaban como presa y botín de los otros, impedidos por sus trabas fatales, hasta que la Naturaleza hubo cumplido la extinción de su raza.*

[traducción en prosa de los versos latinos de Eduardo Valentí Fiol]

Esto escribió, *sobre la naturaleza de las cosas*, el poeta y filósofo romano Tito Lucrecio Caro, precursor del panteísmo, unos mil novecientos años antes del *Origen*. Casi cuatro siglos antes, el atomista Demócrito de Abdera (460-370 a.d.J.) demostró tener no menor intuición cuando afirmó: "todo lo que existe en el universo es fruto del azar y de la necesidad". Pues *azar* y *necesidad* son los dos ingredientes fundamentales de la selección natural: las variaciones son aleatorias, pero la selección de las que son ventajosas resulta inevitable.

Esta combinación de azar y necesidad tiene, por otra parte, una interesante interpretación que permite comprender la presencia simultánea de la contingencia y la convergencia evolutivas en términos matemáticos. Es posible que algunos seres o productos de la evolución, como los ojos a los que antes me referí, sean resultado de la existencia de lo que en el estudio de sistemas dinámicos se denomina *atractores extraños*, zonas de estabilidad, en este caso evolutiva, hacia donde convergen las líneas que dan cuenta de la evolución de un sistema cuando se aproximan a ellas suficientemente. El estudio de lo que cabría denominar el *espacio de fases de* (o de posibilidades para) *la vida* daría cuenta, también, de otro fenómeno al que ya hemos aludido: por qué no todas las morfologías son posibles. La cuestión que se plantea aquí es, simplemente, la extensión y forma de ese espacio de fases. Es evidente que las restricciones y ligaduras impuestas por las leyes de la física y

de la química, con las que todos los procesos biológicos deben ser consistentes, limitan severamente el tamaño y topología de ese espacio. Basta pensar en lo expuesto por el biólogo matemático escocés D'Arcy Wentworth Thomson (1860-1948) en su clásico *On growth and form* (1917), por Haldane en *Possible worlds* (1927) o, más recientemente, en el *morfoespacio* introducido en los sesenta por David M. Raup. Así pues, la contingencia y la necesidad se entremezclan de forma sutil en los procesos evolutivos; nada está predeterminado, pero no todo es posible *a priori*.

4. Pruebas en favor de la evolución

La teoría de la evolución no ha sido contrastada, por ejemplo, en el mismo sentido y con el increíble grado de precisión numérica alcanzado por la teoría de la relatividad de Einstein; dado el extraordinario grado de complejidad de la mayoría de los sistemas sobre los que opera, su capacidad predictiva es más que escasa en términos numéricos y, desde luego, muy, muy alejada de lo que es común en la física. La razón es la ausencia de una 'ecuación de la evolución' (o de unas pocas, aunque, como se verá más adelante, existe ya una *dinámica evolutiva* especialmente aplicable a los organismos más sencillos). Pese a todo, no cabe duda de que está firmemente establecida[9]. Para empezar, y por lo que se

[9]Véanse las *'15 evolutionary gems'* en `www.nature.com/darwin`.

De hecho, cuando se habla de 'teoría de la evolución', la palabra 'teoría' no tiene ahí el sentido de 'hipótesis' o 'especulación'; por el contrario, la evolución constituye un cuerpo de doctrina bien establecido y comprobado en sus aspectos esenciales. Hay, por supuesto, discusión sobre algunos aspectos de la teoría de la evolución como, por ejemplo, si ésta es gradualista *à la* Darwin o si, como sostienen N. Eldredge y S. J. Gould en su controvertida teoría del 'equilibrio puntuado' (1972), la especiación se produce en breves ('puntuales') períodos de tiempo seguidos de una paralización evolutiva o *stasis*. Eldredge y Gould utilizan la gran *disparidad* de vida (riqueza de formas y anatomía, diferente de la *diversidad* o número de especies) en el *Big Bang* de la evolución que mencionaremos seguidamente y que —según ellos— la evolución darwiniana no podría acomodar, como fundamento del 'equilibrio puntuado'. Estas cuestiones, no obstante, no afectan al cuerpo principal de la teoría de la evolución; cabe incluso reseñar que, en la cuarta edición del *Origen*, Darwin introdujo un párrafo que puede considerarse como un antecedente del *'punctuated equilibrium'*. Más aún: encajan perfectamente en el esquema darwiniano si se piensa en los aspectos modernos de la evolución, pues el paisaje del cambio de las adaptaciones evolutivas, determinado por el entorno y los miles de especies que en él co-evolucionan, no tiene por qué variar siempre de forma gradual. La evolución de los propios ecosistemas no es un proceso *lineal* por lo que, una vez se ha cruzado un cierto umbral, puede producirse una avalancha de oportunidades evolutivas y de cambios (por ejemplo, como consecuencia de la variación del porcentaje del oxígeno en el medio). El comportamiento de los ecosistemas evolutivos es muy complejo, con seguridad *caótico* en el sentido matemático del término, al igual que lo es el paulatino crecimiento de una montaña de arena sobre cuya cima se va derramando más arena hasta que, súbitamente, se desmorona sin previo aviso. Darwin no podía —hace 150 años— conocer las matemáticas ni los efectos del caos, pero su selección natural basta para acomodar —si necesario fuera— el 'equilibrio puntuado' de Eldredge y Gould sin necesidad de recurrir a

refiere a los fósiles, cada día se encuentran más 'eslabones perdidos' en las cadenas evolutivas. El Tiktaalit ('pez grande de agua dulce' en *inuktitut*, la forma de la lengua *inuit* en Canadá), descubierto en el ártico canadiense en 2004 y que vivió hace 375 millones de años, tenía en torno a dos metros de largo; sus cuatro aletas —que tenían huesos— le permitían nadar y elevarse en tierra sobre ellas, por lo que es el antepasado de los tetrápodos terrestres actuales entre los que nos podemos incluir. Los ingredientes necesarios para producir patas estaban ya en las aletas del Tiktaalit, auténtico eslabón entre peces y animales terrestres, por lo que cabría decir que este animal de transición era un 'pezápodo'. Este mismo 2009 se ha estudiado el *Schinderhannes bartelsi*, PWL1994/52-LS, un fósil de unos 10 cm encontrado en Hunsrück (Alemania) y que se conserva en el museo de historia natural de Maguncia. Este pequeño depredador está emparentado con los mayores y temibles anomalocáridos ('cangrejos extraños'), unos protoartópodos de un metro de longitud que aparecieron en los esquistos de Burgess en Columbia Británica (Canadá) y que vivieron en los mares del Cámbrico, tras el *Big Bang* de la evolución. Esta explosión de vida, el *crisol de la creación* según Simon Conway Morris, uno de los paleontólogos del equipo de la Univ. de Cambridge que estudió los fantásticos seres del *Burgess shale*, tuvo lugar hace unos 525 Ma. En esa época el *Burgess shale* 'canadiense' se encontraba, debido al movimiento de las placas tectónicas, cerca del ecuador. El *Schinderhannes* extiende el período de existencia de esos curiosos antepasados de los actuales artrópodos en 100 Ma, hasta el período Devónico.

Los paleontólogos, por cierto, no dan siempre muchas pistas con sus denominaciones pese a seguir la nomenclatura binómica establecida por Linneo (1707-78): aunque no sea el caso del *Anomalocaris* ya citado, es difícil adivinar las características de algunos fósiles por el nombre que reciben. Algunos de los extraños seres del *Burgess shale* (*e.g.*, *Marrella splendens* o *Sidneyia inexpectans*) honran a colegas o familiares de Charles Doolittle Walcott, el americano que en 1909 descubrió ese yacimiento —desde 1981 patrimonio de la Humanidad— y que extrajo de él, hasta 1924, unos 65.000 fósiles, alguno con nombre alusivo al lugar, como *Burgessia bella. Schinderhannes,* quizá por ser un depredador, debe su nombre al de un bandido de la zona de Hunsrück del s. XVIII. Pero, oportunidad de los nombres aparte, el número de fósiles intermedios crece constantemente, y todos encajan en las distintas cadenas evolutivas. El propio Darwin afirmó en el Cap. VI del *Origen* ('dificultades de la teoría'): "si se pudiera demostrar que ha existido un organismo complejo, *que no se haya podido formar* [las cursivas son mías] por numerosas, ligeras y sucesivas modificaciones, entonces la teoría se quebraría (*would break down*). Pero no puedo encontrar tal caso". La frase ilustra que Darwin ya se planteaba en su libro —en esa afirmación y en otras semejantes— lo que después se denominaría *refutabilidad* ('falsa-

los exóticos mecanismos evolutivos sobre los que especulan estos autores.

bilidad') de una teoría científica. Es cierto que, desde el punto de vista científico, Darwin se consideraba a sí mismo baconiano y por tanto inductivista; sin embargo, cabe dudar de esa adscripción tan clara a la luz de párrafos como el citado.

La refutabilidad de la teoría de Darwin fue en su día una cuestión importante pues, como estableció el filósofo Karl Raimund Popper (1902-94), las teorías científicas deben ser refutables para merecer ese calificativo. Y en este punto la evolución presentaba, aparentemente, una dificultad: si la selección natural se basa en la supervivencia del más adaptado y el criterio que mide esa adaptación es la supervivencia, parece generarse un círculo vicioso que haría de la evolución una teoría no refutable y, por tanto, no científica en el sentido de Popper. De hecho, y en contraste con el lamarquismo, teoría fácilmente refutable —y refutada— puesto que los cambios que consideraba Lamarck no son hereditarios, Popper calificó inicialmente el darwinismo —ya apoyado por las leyes de Mendel de la herencia— como "casi tautológico". El problema también preocupó a grandes biólogos evolucionistas como C.H. Waddington, J.B.S. Haldane o G. Gaylord Simpson. Popper se refería a la selección natural como un *programa de investigación* exitoso; eso sí, de valor extraordinario e incalculable. Pero en 1978 Popper renegó de su opinión (*recanted*, en su propia expresión) pues, en efecto, la teoría de Darwin sí es refutable. Como ya comentó el gran defensor —*el bulldog*— de Darwin, Thomas H. Huxley (1825-95), para comprobar la falsedad de la teoría de la evolución hubiera bastado "encontrar el fósil de un conejo junto al de un dinosaurio". La refutabilidad de la teoría de la evolución de Darwin, y más aún tras la síntesis moderna, la doble hélice y los desarrollos posteriores, la caracteriza como auténtica teoría científica. Y que no sólo *explica*: la genética de poblaciones, por ejemplo, permite *predecir* matemáticamente algunas propiedades de su evolución. El comportamiento de los virus, por ejemplo, se puede describir en términos evolutivos. Nadie duda hoy que la peligrosidad del virus de la gripe es consecuencia de su versatilidad para mutar y adaptarse. Esta capacidad permite comprender comportamientos de algunas enfermedades que son aparentemente extraños: en 1990, se utilizó la *dinámica evolutiva* para explicar el desfase que existe entre la infección por el VIH y la presencia de los primeros síntomas del SIDA. Éstos aparecen cuando la creciente diversidad del virus alcanza un grado que desborda la posibilidad de respuesta del sistema inmunológico humano, como mostraron el polifacético australiano Robert May (1936-), *Baron May of Oxford* (físico teórico, zoólogo, matemático y uno de los pioneros del caos en matemáticas) y su antiguo colaborador, el vienés —hoy en Harvard— Martin A. Nowak (1965-). Hace poco Nowak ha publicado un libro cuyo título habla por sí mismo: *Evolutionary Dynamics: Exploring the Equations of Life* (2006).

Pero volvamos a la historia de la vida. Los primeros indicios sobre la Tierra podrían llegar a tener unos 3800 o 3500 Ma, aunque esta fecha es difícil de establecer con preci-

sión porque estudios recientes muestran que es posible que procesos abióticos —ajenos a la vida— mimeticen eficazmente morfologías que sí son realmente de origen microbacteriano, lo que dificulta que los micropaleontólogos identifiquen con seguridad los rastros de vida más antiguos. Éstos son probablemente los estromatolitos (como los encontrados en Australia o en el estado de Montana) de hace unos 3500 Ma, aunque también hay que descartar completamente que tengan un origen inorgánico. La cuestión del origen de la vida ya preocupó al propio Darwin: al fin y al cabo, la teoría de la evolución supone que la vida ha tenido un origen (o unos pocos), punto de partida para la propia evolución y el desarrollo de las distintas especies. En 1871 Darwin, en una carta a Hooker, escribió un famoso y premonitorio pasaje sobre la 'pequeña charca caliente' que reproduzco aquí sin traducir: *"But if (and Oh! what a big if!) we could conceive in some warm little pond, with all sorts of ammonia and phosphoric salts, light, heat, electricity, etc., present, that a protein compound was chemically formed ready to undergo still more complex changes, at the present day such matter would be instantly devoured or absorbed, which would not have been the case before living creatures were formed"*. Pero como esas ideas eran demasiado avanzadas para su tiempo, añadió: *"It is mere rubbish thinking at present of the origin of life; one might as well think of the origin of matter"*. Poco podía Darwin imaginar que la conversión energía-materia, por ejemplo, sería algo rutinario en los laboratorios menos de un siglo después. Tras Darwin, Alexandr I. Oparin (1894-1980) y J.B.S. Haldane realizaron en los años veinte propuestas en el mismo sentido. Pero fue pocas décadas después, en 1952, cuando el experimento en la Univ. de Chicago de Stanley Miller (1930-2007), siguiendo las ideas de su tutor y premio Nobel Harold Urey (1893-1981), demostró que era posible obtener compuestos orgánicos —aminoácidos— a partir de un caldo inorgánico sometido a unas condiciones que mimetizaban las de la Tierra primitiva. Falta aún, por supuesto, el *experimentum crucis* por antonomasia: la creación de vida en un laboratorio, aunque sea un modesto virus. Éste sería, en primera aproximación, el análogo en biología de la producción de partículas en física por medio de un acelerador. Quizá pueda pensarse que crear un virus resultará imposible. Pero recordemos que las clonaciones, iniciadas en 1997 con la de la oveja *Dolly*, constituyeron entonces un avance —científico— espectacular que hoy ya no produce sorpresa alguna. Nada queda del asombro inicial, hoy reemplazado por una justificada preocupación ante imágenes que evocan la sociedad supuestamente feliz del *Brave New World* (1932) de Aldous Huxley (1894-1963), el nieto novelista del *bulldog* de Darwin.

Sea cual sea la fecha exacta del origen de la vida, lo cierto es que es muy antigua, casi tanto como la propia Tierra; se podría decir que la vida aprovechó la primera oportunidad disponible para desarrollarse. Los primeros vertebrados, animales con espina dorsal, surgieron hace más de 400 Ma, y su —nuestro— antepasado más remoto es *Pikaia gracilens*,

el primer cordado, que apareció en la explosión de vida del Cámbrico. Los mamíferos surgieron hace unos 200 Ma, y los primeros homínidos se remontan a hace algo más de 3 Ma, como es el caso de *Lucy*, la famosa adolescente de *Australopithecus afarensis*, o incluso a 4'4 Ma incluyendo a los *Ardipithecus ramidus*, de cerebro aún más pequeño (350 cm^3) y también descubiertos en la famosa depresión de Afar en Etiopía. Mucho antes, hace 5-7 Ma, se había separado la rama de los chimpancés de la del linaje humano; somos pues primos, no nietos, de los actuales primates. El *Homo erectus*, ya con una capacidad craneana en torno a 1000 centímetros cúbicos evolucionó en África hace algo más de 1'8 Ma, y es el primer emigrante intercontinental entre nuestros ancestros. El cerebro del hombre actual oscila —bastante— alrededor de los 1400 cm^3 (370 al nacer), con unos 100 cm^3 menos el de la mujer. El europeo más antiguo conocido, de hace 780.000 años, es el *Homo antecessor* de Atapuerca (Burgos), quizá el último antepasado común del hombre de Neardenthal y de nosotros mismos, pues el *Homo Neardenthalensis*, que llegó a convivir con el hombre de Cro-Magnon (el pintor de Altamira y de Lascaux, ejemplo de *Homo sapiens* europeo y que sí es antepasado nuestro), se extinguió hace unos 30.000 años. Así pues, y por lo que nos concierne a los seres humanos, hace tiempo que se encontró el famoso 'eslabón perdido'. Y no uno, sino cientos de ellos.

Pero, actualmente, la evolución no sólo se apoya en el registro fósil, hoy abundantísimo, aunque en su tiempo los 'saltos' preocuparon mucho a Darwin, que dedicó el cap. IX del *Origen*, *'On the imperfection of the geological record'*, a este problema. Actualmente el enfoque multidisciplinar de la embriología comparada y la biología del desarrollo, hoy *evo-devo* (por *evolution and development*) y las modernas técnicas de la biología molecular han hecho posible reconstruir el 'árbol de la vida'. Por lo que se refiere a los actuales seres humanos, estudios genéticos recientes con decenas de miles de personas de todas las razas han comprobado su origen común africano, trazado las rutas migratorias y *demostrado* la completa e íntima relación de todos los pueblos de la Tierra. Los estudios moleculares de la evolución tienen, además, una gran ventaja respecto de los antiguos árboles evolutivos basados en la anatomía comparada: permiten *cuantificar* las diferencias. El análisis del ADN y las proteínas permite estudiar y caracterizar numéricamente la ramificación de los linajes a partir de antepasados comunes (*cladogénesis*) así como la variación acaecida en un linaje determinado hasta que aparece una nueva especie que sustituye a la anterior sin que haya bifurcación en el árbol filogenético (*anagénesis*). Se han cumplido, al menos en parte, las expectativas del padre de la genética moderna y premio Nobel (1933) Thomas H. Morgan (1866-1945) quien, en 1919, afirmaba que "el hecho de que los aspectos fundamentales de la herencia hayan resultado tan extraordinariamente sencillos apoya nuestra esperanza de que, después de todo, la Naturaleza pueda ser abordable por completo... Esto es alentador, ya que si el mundo en que vivimos fuera tan complicado como algunos

nos pretenden hacer creer, podríamos muy bien perder la esperanza de que la biología pudiera convertirse en una ciencia exacta". Con frecuencia la prensa refleja lo muchísimo que compartimos de nuestros 25.000 genes con los chimpancés... y con otros seres vivos menos 'elevados'; no parece haber, además, ningún gen específicamente humano. Precisamente, el estudio de la divergencia genética entre el hombre y el chimpancé ha sufrido un fuerte impulso desde la publicación de los genomas completos de ambas especies. Pero el análisis de las bases moleculares que determinan la especie humana va más allá de la pura variabilidad en las secuencias génicas que conforman las proteínas: muchas de las diferencias fenotípicas que caracterizan una especie residen probablemente en los cambios evolutivos que regulan la manifestación —la *expresión*— de los genes, que puede estar condicionada por el entorno y que hace algo más complejo el balance entre *nature* y *nurture*.

5. Impacto sociológico y controversias sobre la evolución

Así pues, si tan firmemente está establecida la evolución, ¿por qué suscita aún tanta controversia? ¿Cuál es la razón para que la teoría de Darwin originara una auténtica revolución *ideológica* que no produjo, por ejemplo, la física nuclear o incluso el descubrimiento de la doble hélice? El motivo es sencillo: las ideas de Darwin cambiaron para siempre el lugar del hombre en el universo. La teoría de la evolución es un golpe más al antropocentrismo tan querido a los seres humanos, que puede tener (también) un origen religioso en la medida en la que el hombre se considere creado a imagen y semejanza de Dios. Cada vez que el pedestal sobre el que nos gustaría imaginarnos pierde altura aparece una reacción contra la causa que lo rebaja. Ya se produjo cuando la caída del geocentrismo, cuyo momento más representativo es el juicio a Galileo en 1633, y de nuevo apareció tras la difusión de las ideas de Darwin. George Bernard Shaw (1856-1950) reflejó muy bien el origen de esa reacción: "al principio uno no se da cuenta de lo que implica [la evolución]. Pero cuando se empieza a comprender todo su significado, el corazón se hunde en un montón de arena. Hay un terrible fatalismo en todo ello, una reducción atroz y detestable de la belleza y de la inteligencia, de la fuerza y del propósito, del honor y de sus aspiraciones". Resulta difícil no reconocer un punto de verdad en esa reflexión y no contemplar con simpatía los sentimientos del autor de historias tan deliciosas como *Lluvia* aunque, si bien Shaw contemplaba con ternura la condición humana, no se hacía muchas ilusiones sobre ella. Por su parte, el premio Nobel Steven Weinberg (1933-), probablemente el físico más ilustre vivo, llegó a afirmar en un contexto diferente: "cuanto más sabemos del mundo, menos sentido parece tener", aunque luego trató de matizar el sentido de sus palabras. Pero el núcleo del rechazo que a veces produce la teoría de Darwin es éste: la evolución nos habla de nosotros mismos, de nuestra naturaleza, y establece que ésta tiene una elevada componente biológica que se encuentra al margen de nuestros deseos, ilusio-

nes... y de nuestro control. Nos dice mucho de lo que somos —con independencia de lo que nos gustaría ser— y de cómo hemos llegado a serlo. Y lo que la evolución nos enseña no siempre es fácil de aceptar pues, como escribió el pionero de la genética molecular y premio Nobel (1965) Jacques Monod (1910-1976), los seres humanos "queremos ser necesarios, inevitables [...]; todas las religiones, casi todas las filosofías, incluso una parte de la ciencia, dan testimonio del esfuerzo incesante y heroico de la humanidad, negando desesperadamente su propia contingencia[10]".

Todo pensamiento social, político o religioso debe comenzar con una visión específica de la naturaleza humana, y es evidente que la evolución tiene mucho que decir sobre ella. Por eso la evolución ha chocado con dogmas religiosos y políticos, especialmente en la medida en la que éstos han tratado de imaginar al hombre a su gusto para, después, moldearlo a su conveniencia. Basta recordar el rechazo inicial de las Iglesias cristianas a la evolución, la actitud del Islam[11], o la persecución —cuando no 'eliminación'— por Stalin de los genetistas mendel-morganianos contrarios a las 'teorías' del agricultor Trofim Denisovich Lysenko (1898-1976), cuya 'biología proletaria', desprovista de toda base científica, no sólo motivó purgas, persecuciones y muertes, sino que llevó la agricultura soviética al desastre durante muchos años[12]. Es evidente que la teoría de la evolución de Darwin

[10] *"nous nous voulons nécessaires, inévitables [...] ; toutes les religions, presque toutes les philosophies, une partie même de la science, témoignent de l'inlassable, héroïque effort de l'humanité niant désespérément sa propre contingence"* (*Le hasard et la nécessité*, cap. 2, 1970).

[11] Incluso en la supuestamente secular Turquía, una alta institución gubernamental (el Consejo de Investigación Científica y Tecnológica, TÜBİTAK) suprimió a principios de año un artículo sobre Darwin en su revista oficial, *Bilim ve Teknik* (Ciencia y Tecnología), cesando a su directora por oponerse a esa censura. Tras el consiguiente escándalo de la comunidad científica, la directora recuperó su puesto, y TÜBİTAK ha anunciado que *Bilim ve Teknik* dedicará un próximo número a la teoría de la evolución.

[12] La persecución de Stalin produjo un retraso de décadas de la genética soviética. En 1964, el ilustre físico y premio Nobel de la paz Andrei Sakharov (1921-89) afirmó en la asamblea general de la Academia de Ciencias: "[Lysenko] es responsable del vergonzoso retraso de la biología soviética y de la genética en particular, de la diseminación de opiniones pseudocientíficas, de aventurerismo, de la degradación de la educación y de la difamación, despido, arresto e incluso muerte de muchos auténticos científicos". Entre los pocos críticos que tuvo Lysenko en su apogeo se encontraba la pequeña comunidad de físicos cuánticos y nucleares, sobre la que se cernió otra purga que no llegó a materializarse —por consejo de Beria— para no poner en peligro el programa atómico de la URSS. Como ha dicho el historiador Tony Judt a ese respecto, "quizá Stalin fuera un loco, pero no era estúpido". Stalin murió el 5 Marzo de 1953; si hubiera vivido un par de meses más, quizá habría sido informado del descubrimiento de la doble hélice, publicado en el número de *Nature* del 25 de Abril, que explicaba la base molecular de la herencia de forma incompatible con las fantasías de Lysenko; quizá —también— esa incompatibilidad hizo que el descubrimiento no circulara en la URSS hasta 1956. Lysenko perdió sus últimos cargos en 1965, un año después de la caída de Khruschev.

El *affaire* Lysenko ha sido soslayado en Occidente durante décadas, cuando no ocultado, por muchos sectores que consideraban impropio criticar el comunismo de la URSS o 'socialismo real', por lo que aún

es más sombría que la visión volitiva del lamarquismo, que parecería concedernos algún control sobre nuestro propio futuro, al menos como especie. Pero no es cuestión de gustos: Lamarck no acertó con la causa de los cambios y la razón nos obliga a aceptar la selección natural. Quizá sea optimista suponer el triunfo de la razón pero, como dice Darwin en *The Descent of Man*, en la cita que encabeza este ensayo, *"of all the faculties of the human mind, it will, I presume, be admitted that Reason stands at the summit"*. Pese a todo, no todas las consecuencias de la evolución, y en especial las que afectan a la mente, a nuestra personalidad y comportamiento, son fáciles de aceptar. Incluso algunos ilustres biólogos evolutivos parecen resistirse a admitirla con todas sus consecuencias cuando —aunque sea de forma inconsciente— ésta choca con ideas que les son queridas, una cuestión sobre la que volveré después.

6. Visiones de la naturaleza humana y sus implicaciones

Puesto que toda *Weltanschauung* requiere una visión previa de la naturaleza humana, conviene detenernos un momento para considerar este punto. ¿Qué (pre-)concepciones existen sobre ella? Asumiendo el inevitable riesgo de simplificar en una cuestión tan importante como delicada cabría decir que, a lo largo de la historia, se han dado tres visiones distintas, no del todo excluyentes entre sí. La primera supone que, al nacer, la

es poco conocido y merece un comentario. Incluso cuando se menciona hoy, no siempre se hace en sus justos términos. Hace un año, por ejemplo, un conocido biólogo evolucionista de habla hispana se refería en una conferencia al *affaire* Lysenko como un lamentable ejemplo de 'politización de la ciencia' cuando, en realidad, fue una demostración de *texto* de 'cientifización —valga la palabreja— de la política', es decir, de sancionar una política como ciencia, lo que tiene un carácter bien distinto (y es mucho peor). Y es que, al margen del trasfondo de lucha por el poder que tuvo el famoso *affaire*, sí había una razón de peso para que a Stalin le desagradara la genética convencional y la visión de Darwin de la evolución. En un panfleto de 1906 escrito en georgiano, *¿Anarquía o socialismo?*, Stalin ya había mostrado su simpatía por las ideas de Lamarck, más proclives a que el cambio producido por la volición y el esfuerzo se transmitiera a las nuevas generaciones, consolidando así la mejora social. Ese artículo reapareció en una recopilación de escritos de Stalin, ya en ruso, dos años antes de la explosión del *affaire* Lysenko en el verano de 1948. Iurii Zhdanov, jefe del departamento científico del Comité Central, yerno de Stalin (estaba casado con Svetlana) y conocedor de su inclinación por el neo-lamarquismo, explicó entonces en una conferencia el por qué de esa afinidad (curiosamente, tratando de nadar entre dos aguas, pues Zhdanov era contrario a Lysenko): "los comunistas están necesariamente obligados a contemplar con mayor simpatía una doctrina que establezca la posibilidad de una reconstrucción [*peredelka*] y reorganización o remodelación [*perestroika*] del mundo orgánico, sin tener que esperar a cambios repentinos, accidentales e incomprensibles de un misterioso plasma hereditario". Así pues, y aunque personalmente Stalin no debía apreciar en exceso a Lysenko, el lamarquismo era más propicio al dogma político en vigor que la genética y la evolución darwiniana. Pero, en contra de lo que creía Stalin y deseaban otros, los caracteres adquiridos no se heredan, y moldear a los seres humanos de forma interesada y perenne requería también *reeducar* a la propia naturaleza, un empeño afortunadamente imposible.

mente de los seres humanos es una *tabula rasa*, una pizarra en blanco, sobre la que en sus primeros años se puede escribir todo lo que determinará su vida adulta. Esta visión se remonta a los estoicos griegos y a S. Tomás de Aquino (1225-1274); John Locke (1632-1704) la utilizó para criticar a la aristocracia, que no podría justificar privilegios innatos si las mentes de nobles y plebeyos comenzasen igualmente vacías. La segunda, la del *buen salvaje*, se debe a Jean-Jaques Rousseau (1712-78): los seres humanos son naturalmente buenos (justos y benéficos, como exigía serlo a los españoles el art. 6 de la constitución de 1812, *la Pepa*) hasta que la sociedad los corrompe. La tercera visión se basa en la separación entre *alma y cuerpo*, de antigua tradición religiosa y formulada especialmente por René Descartes (1596-1650). Según ésta, el alma gobierna el cuerpo y toma decisiones con independencia de los procesos biológicos que lo rigen. Frente a todas estas concepciones la evolución nos muestra que, biológicamente hablando, existe una naturaleza humana en parte determinada genéticamente. Pues, como afirmó John Maynard Smith, (1920-2004), uno de los impulsores de la síntesis moderna de la evolución, *"to pretend that we are a completely abstract being upon which the environment writes whatever messages it likes is clear nonsense... the human mind, like human arms and legs and heart and so on, is a product of natural selection... that is not to say that what we do is genetically determined. It is just simply to say that our capacities and abilities are determined by evolution in just the same way that other features are"*. En la vieja polémica sobre la importancia relativa de la herencia (el genotipo) y el ambiente —*nature vs. nurture*— como factores determinantes de lo que somos, la evolución pone de manifiesto el enorme peso de la herencia sobre el entorno, suponiendo, claro está, ambientes no demasiado dispares.

Podría parecer que la adopción de una u otra visión sobre la naturaleza humana es una cuestión relativamente menor, sin grandes consecuencias prácticas. Pero no es así. Por ejemplo, los padres que estén convencidos de que la mente del niño es una *tabula rasa* se culparán si sus hijos no alcanzan las metas propuestas, pues ello probaría que han sido incapaces de educarlos debidamente (lo que tampoco se puede excluir). Toda una escuela de psicología muy influyente en el segundo tercio del s. XX, la conductista (o 'behaviorista', de *behaviour*, conducta), y especialmente la versión más radical del psicólogo de Harvard B. F. Skinner —quien consideraba que el hombre no tiene comportamientos innatos sino sólo en función del entorno— se halla tras la *tabula rasa*. Los lectores de cierta edad recordarán un libro muy popular en los años cincuenta y sesenta del Dr. B. Spock, *The common sense book of baby and child care* (1946), *Tu hijo* a secas en versión española, que recordaba a las madres que "sabían más de lo que pensaban" sobre cómo tratar adecuadamente a sus pequeños. El Dr. Spock, que vendió 50 millones de ejemplares de su libro en todo el mundo, defendía el sentido común frente a los excesos conductistas entonces en boga, sobre todo en los Estados Unidos.

La hipótesis de la *tabula rasa* tiene también implicaciones políticas, y ha resultado muy útil a todos los regímenes totalitarios: no es casualidad que la genética mendeliana estuviera prohibida y perseguida durante el estalinismo. Aunque el affaire Lysenko (véase la nota 12) puede presentarse como una cuestión de oportunismo político, el conflicto es más profundo: existía una contradicción esencial entre el comunismo de la URSS (o 'socialismo real' en *newspeak*) y la teoría de la evolución, es decir, entre la posibilidad de moldear a los seres humanos por medio de un adecuado entorno social, por un lado, y la selección darwiniana (no lamarquista) por otro. Como dijo Maynard Smith, en una entrevista realizada (2001) en la Univ. de Sussex y tras confesar su simpatía por el socialismo (sin adjetivos): "hay un profundo conflicto entre la visión marxista del hombre... [para la] que el ser humano podría ser cualquier cosa dependiendo del entorno social, y una visión más darwinista;... estas dos visiones se oponen profunda y mutuamente; no creo que haya ninguna forma de evitarlo[13]". Pese a ser ambas visiones materialistas, existe una contradicción esencial entre las concepciones comunista y darwinista del hombre, pese a que a veces se ha usado a Darwin en apoyo del marxismo[14]. Por ello, como también comentaba Smith en esa misma entrevista, no es posible reducir el affaire Lysenko a una simple lucha por el poder. El problema de la utilización política de la tabula rasa, por otra parte, no se limitó al totalitarismo de la URSS: tanto el dicho de Mao "los mejores poemas se escriben en un libro en blanco" como las alusiones al 'hombre nuevo' del nazismo en Alemania tienen todo tipo de connotaciones siniestras. Y aunque el caso del nazismo fue diferente en su planteamiento[15], no lo fue en sus trágicas consecuencias.

[13] *"There is a strong conflict between the Marxist view of Man... that the human being could be anything depending on the social environment, and a more Darwinist view;... and these two views are deeply opposed to one another; I don't think there is any way around it".*

J. Maynard Smith comenzó como ingeniero aeronáutico para transformarse después en biólogo evolucionista bajo la dirección de J. B. S. Haldane (1892-1964), genetista de poblaciones. Smith fue el primero en aplicar la teoría de juegos a la genética de poblaciones. Comunista en su juventud, acabó abandonando el partido pocos años después que lo hiciera su maestro y amigo, Haldane, y por razones parecidas. La actitud de éste (etoniano como Maynard Smith), inicialmente entusiasta con el comunismo, cambió al alcanzar Lysenko su máximo poder en la URSS, acabando —tras un período de ambigüedad política— dándose de baja en el partido comunista.

[14] Es curioso recordar que Karl Marx (1818-83) propuso a Darwin dedicarle la traducción inglesa del primer volumen de *Das Kapital*, ofrecimiento que Darwin declinó cortésmente.

[15] El régimen nazi, distinto pero igualmente totalitario, preconizó una falsa idea de progreso que utilizó para justificar la supuesta superioridad aria y el racismo que, finalmente, condujo a los campos de exterminio. El propio Hitler inspiró esas ideas, que ya afloran en su *Mein Kampf* (*Mi Lucha*, 1925 y 1928). Stalin se opuso a la genética mendel-morganiana al apadrinar a Lysenko, y autorizó que se persiguiera con saña a quienes se oponían a él; Hitler deformó las doctrinas de la antropología de la época hasta transformarlas en una doctrina política aberrante. Se ha afirmado repetidamente que el biólogo Ernst Haeckel (1834-1919), el popularizador de las ideas de Darwin —su 'apóstol'— en Alemania, inspiró el

Pero la *tabula rasa* no sólo es la base de la actuación de regímenes totalitarios proclives a la ingeniería social. Añadiré sólo un ejemplo más, quizá inesperado: también está implícita en lo que el psicólogo evolucionista de Harvard Steven Pinker (1954-) ha llamado con acierto *'authoritarian high modernism'* en la arquitectura. Se trata aquí de la planificación de edificios y áreas urbanizadas de acuerdo con la peculiar interpretación del arquitecto de turno de las necesidades y apetencias de los seres humanos, que son meros sujetos pasivos del experimento constructor o urbanizador, concebido de forma autoritaria 'desde arriba' (de ahí el *'high'*). En la antigua URSS o en los países del Este hay buenos ejemplos de esa arquitectura planificada que presta poca atención a las personas, y también en Occidente. Uno de los máximos exponentes de esta tendencia fue Le Corbusier (1887-1965), cuyos planes en los años veinte para derruir y reedificar barrios enteros de París no se llevaron afortunadamente a cabo, pero cuyo 'modernismo autoritario' y su visión urbanística des-

racismo de los nazis, pero esto es dudoso. Haeckel tenía gran devoción por J. Wolfgang von Goethe (1749-1832) quien, además de su justa fama como poeta, escritor y dramaturgo, tenía una vocación científica no desdeñable. Goethe, romántico a la par que científico, fue propagador en Alemania del panteísmo de Baruch Espinoza —una forma educada de ateísmo según Schopenhauer— que más tarde abrazaría Einstein. Pero Goethe fue también el gran representante de la 'filosofía de la naturaleza', según la cual todos los seres son reflejo de una inevitable tendencia a la perfección. Sus ideas influyeron en muchos biólogos del s. XIX, Haeckel incluido; éste consideraba a Goethe como el fundador de la anatomía comparada. Ciertamente Haeckel fue más allá del 'darwinismo social' del pensador liberal inglés Herbert Spencer (1820-1903), que fue quien acuñó —y no Darwin— la expresión *'survival of the fittest'*, y es probable que la creencia de Haeckel y sus monistas en el 'progreso' contribuyera a crear un pernicioso caldo de cultivo para el racismo nazi (aunque Haeckel falleció catorce años antes de la llegada de Hitler al poder). Sin embargo, algunos estudios recientes del historiador de la Univ. de Chicago R. J. Richards han cuestionado la directa influencia de Haeckel en la ideología nazi. Haeckel, ateo y materialista militante, no podía ser un buen modelo para el régimen de Hitler, y Marx, que no era apreciado precisamente por los nazis, había mostrado en su día su respeto por Darwin (aunque desprecio por Malthus, quien le había inspirado la selección natural). De hecho, consta que Haeckel no era especialmente bien considerado por el partido nazi, que rechazaba su monismo materialista. Y, si bien el árbol evolutivo de Haeckel de las 'nueve especies' del hombre podía justificar el racismo, tampoco era muy útil para los desvaríos del nazismo: Haeckel establecía jerarquías raciales —algo común en la antropología de la época— pero ponía en la cumbre a los germanos junto a judíos, romanos y bereberes (Haeckel hablaba del *'Homo Mediterraneus'* como "el más desarrollado y perfecto"). Así pues, aunque los nazis utilizaron la falsa idea del 'progreso evolutivo' para alimentar sus fantasías raciales, es muy probable que ello fuera bajo el ambiente de la antropología del momento, del que sería fácil aprovecharse, más que por seguir especialmente a Haeckel. El 'racismo científico' era moneda común en el s. XIX y no sólo en Europa, pues también estaba detrás de las leyes de segregación racial en Estados Unidos y, de hecho, constituía la justificación más o menos velada del colonialismo occidental (aunque, antes, los pueblos primitivos habían contribuido a inspirar la tesis del 'buen salvaje'). Sea como fuere, lo cierto es que, aunque con motivos y fines diferentes, tanto Hitler como Stalin deformaron las ideas científicas para 'adaptarlas' a sus objetivos políticos y conseguir así una pretendida respetabilidad. Como ha señalado el historiador inglés Alan Bullock en su libro *Hitler and Stalin, parallel lives* (1991), hay muchos paralelismos plutarquianos en las vidas de los dos grandes tiranos europeos.

humanizada —poco habitable— dejaron su huella en la ciudad de Chandigarh, al norte de la India, y en Brasilia, ésta diseñada bajo su influencia por Lucio Costa en 1956 (y construida en cuatro años). Aunque Le Corbusier es quizá el caso más conocido, algo semejante se podría decir hoy de otros arquitectos, incluso de galardonados con el premio Pritzker, mal llamado —por razones que no cabe detallar aquí— *Nobel* de la arquitectura. La rígida frialdad de muchos edificios actuales refleja, en el fondo, una negación autoritaria y antidemocrática, etimológicamente hablando, de la naturaleza humana. Implica una *deshumanización* del hombre, que ha de adaptarse a la particular concepción del arquitecto para su entorno vital, visión que con demasiada frecuencia ignora las necesidades más básicas de nuestra especie: facilidad para la interacción social, escala humana, luz natural, vistas verdes, etc. En otro lugar[16] me he referido a la extraordinaria polémica que se suscitó en el Reino Unido y fuera de él cuando, en 1989, el príncipe Carlos criticó abiertamente a los arquitectos británicos. El príncipe les acusaba de haber destrozado el perfil urbano de Londres, que había permanecido prácticamente inalterado desde las *vedute* de Canaletto del s. XVIII hasta los años sesenta, a la par que censuraba la vana pretensión de muchos arquitectos según la cual sólo ellos están capacitados para juzgar la arquitectura. La gremial y airada respuesta del *Royal Institute of British Arquitects*, realizada desde la misma BBC donde el príncipe de Gales había vertido sus críticas en un programa televisivo dirigido por él, *A vision of Britain*, fue —sin proponérselo— una excelente muestra del pensamiento que oculta el *'authoritarian high modernism'*.

Consideremos ahora la visión de la naturaleza humana que se halla tras el *noble* o *buen salvaje*. Sus partidarios tenderán a responsabilizar a la sociedad de toda conducta delictiva: 'todos somos culpables' es la frase políticamente correcta de ese grupo. Acusando a la sociedad, que por no poseer personalidad jurídica no responde ante ningún tribunal, se elimina toda responsabilidad personal sin que nadie la adquiera en su lugar. Esto facilita que, a veces, los criminales parezcan tener más derechos que sus víctimas, a las que la ley no contempla suficientemente cuando aún no lo son y no puede proteger ya cuando han pasado a serlo. Hasta la intencionalidad de las penas puede tener un carácter distinto según la visión que la ley tenga del propio delincuente. Así, el derecho anglosajón, que parte de una visión menos optimista o más pragmática de la naturaleza humana que el español, confiere a las penas una mayor componente de escarmiento que el nuestro que, se diría, es de inspiración rousseauniana.

La tesis del buen salvaje tiene también importantes y nocivas consecuencias para la educación, al suponer que un niño progresará por sí mismo si no se le desvía de su curso; quizá fuera ese optimismo el que —como se le ha reprochado a Rousseau— permitió al autor del *Emilio* confiar sus cinco hijos a un hospicio, que en el París del s. XVIII no sería

[16] Artículo publicado en el diario *Las Provincias* de Valencia del 22-X-1989.

mejor que los orfanatos victorianos que Dickens describió en *Oliver Twist*. Aproximándonos algo más en el tiempo, en una escuela de tipo *Summerhill* o *Beacon Hill* (fundadas en 1921 y 1927 por A.S. Neill y Bertrand Russell respectivamente) no debe haber exámenes ni calificaciones; los niños son libres de ir a clase o no. Pero, dejando al margen esta concepción de la enseñanza[17], las visiones actuales más o menos optimistas de la pedagogía (como la constructivista de la LOGSE de 1990) tienden a soslayar una obviedad: que la educación también debe proporcionar al cerebro los conocimientos que necesita y que no posee instintiva, es decir, inicialmente, objetivo que no debe ser relegado a un segundo plano. La evolución ha grabado en nuestra mente recursos que nos indican, sin necesidad de estudio, cuándo debemos comer o protegernos del frío e, incluso, que nos permiten aprender a hablar con rapidez pues, como por ejemplo sostiene Pinker, con toda probabilidad el lenguaje es un instinto: un niño nace con la *capacidad* de aprender a hablar rápidamente, pero necesita más tiempo para saber atarse unos zapatos. De hecho, como señaló Noam Chomsky (1928-), lingüista del *Massachussetts Institute of Technology*, la estructura de las gramáticas de los distintos idiomas parece ser universal (una dificultad más, dicho sea de paso, para el conductismo de Skinner ya criticado), aunque Chomsky sea escéptico respecto al origen evolutivo del lenguaje. Pero éste, como los instintos, *evoluciona*, como Nowak mostró matemática y cuantitavamente en un artículo de *Nature* de 2007. En cualquier caso, es evidente que aunque podamos aprender a hablar sin esfuerzo, sin un serio aprendizaje previo no podemos escribir y, menos aún, llegar a ser médicos o abogadas. El estudio está, precisamente, para compensar las carencias de nuestro cerebro ante situaciones para las que no está evolutivamente preparado. En consecuencia, toda pedagogía debería estar racionalmente destinada a resolver este déficit de la forma más eficaz y equilibrada; ignorar esta realidad puede resultar popular ('los exámenes son traumas innecesarios', etc.), pero es tan demagógico como perjudicial para niños y jóvenes. A veces pienso que el *Origen* (y un buen curso de etología, a la que luego me referiré) debería ser lectura obligada para toda autoridad educativa o legislativa, al igual que las matemáticas lo son para los ingenieros. Malo es tener preconcepciones sin fundamento, pero peor es pretender que la naturaleza se ajuste a ellas.

Por su parte, el dualismo del alma y el cuerpo confiere a los seres humanos —portadores

[17]Esta pedagogía romántica y libertaria, exenta de toda competitividad y exámenes, fue anticipada en España por la *Escuela Moderna* que fundó en 1901 el pedagogo, masón y anarquista Francisco Ferrer Guardia (1859-1909) en Barcelona, cuyos boletines se declaraban en defensa de la 'escuela científica y racional'. La *Escuela* tuvo una vida difícil hasta que fue cerrada en 1906 al descubrirse, tras el atentado a Alfonso XIII, que Mateo Morral había estado ligado a ella. Ferrer, preocupado por la enseñanza de los niños menos favorecidos, promovió después la *Liga internacional para la educación de la infancia*, en cuyo comité también figuró Ernst Haeckel por Alemania. No obstante, los intentos de Ferrer de reabrir la *Escuela Moderna*, hasta su trágico fusilamiento hace ahora cien años, ya no tuvieron éxito.

de alma— una posición exageradamente privilegiada en la naturaleza que puede servir para justificar cualquier exceso. Así pues, el empirismo de la *tabula rasa*, el romanticismo del noble salvaje y el dualismo cartesiano tienen serias implicaciones de todo tipo. Por ello, muchos de sus adherentes han sido y son críticos con los estudios científicos que insisten en la importancia de la componente evolutiva, biológica, de la naturaleza humana, y muy especialmente en la medida en la que pueda contradecir sus propios credos. Es mucho lo que está en juego: las actitudes de los defensores de cualquiera de las tres creencias citadas y, en ocasiones, responsables también de sus excesos, quedarían sin justificación si aceptaran lo sesgado de sus convicciones. Por eso los descubrimientos sobre la naturaleza humana son a menudo recibidos con recelo: se piensa que atacan ideales de progreso (tal como los entienden, claro está, quienes cuestionan los aspectos biológicos de nuestra naturaleza) o, en otras, que nos roban parte de nuestro ser más íntimo. No es casual que Dostoyevski, en la que quizá es la mejor novela que se ha escrito desde *El Quijote*, hiciera afirmar a Dmitri Karamazov (¡en 1880!) que "siente perder a Dios" cuando concluye que sus pensamientos son simple resultado de la actividad nerviosa de su cerebro. O, como afirmó Kasparov con considerable hipérbole tras perder al ajedrez frente al *Deep Blue* de IBM, en 1997: "esto es el fin de la humanidad". Sin embargo, lo único que experimentalmente demostró su derrota —que había sido precedida por una victoria— fue lo erróneo de los interesantes razonamientos de Edgar Allan Poe en *El jugador de ajedrez de Maelzel* (1935). Poe, que nació en 1809 como Darwin, argumentaba incorrectamente que todo autómata que ganara una sola vez al ajedrez debería ganar siempre, concluyendo —con acierto, pese a la falsa premisa— que, como 'El Turco' no era imbatible, dentro de ese autómata debía ocultarse una persona. El error del razonamiento de Poe resalta una característica fundamental de la evolución: como el programa de *Deep Blue*, la selección natural no requiere de una inteligencia que dirija sus pasos, y el éxito de una variación en unas circunstancias no garantiza que se repita en otras.

7. La peligrosa idea de Darwin

La realidad, por su parte, es tozuda. Por ejemplo, los famosos estudios de la antropóloga Margaret Mead sobre los aborígenes de Nueva Guinea y Samoa, otrora pilares de la romántica tesis del noble salvaje, han tenido que ser sustancialmente revisados; la mente no es el *white paper* de Locke, sino un producto de la evolución (sobre el que con demasiada frecuencia se puede escribir bien poco), etc. La resistencia a reconocer la realidad de una naturaleza humana biológica, innata y menos permeable —más rígida— de lo que se desearía, refleja un intento de reservar parcelas protegidas, sobre las que la ciencia no debe investigar y, si lo hace, no debe extraer conclusiones. En el caso que nos ocupa ha habido también algún científico evolucionista que ha adoptado una posición inapropiada. Stephen

Jay Gould (1941-2002), gran divulgador y quizá no tan buen paleontólogo pese a su fama, y el ilustre genetista y estudioso de la genética de poblaciones Richard Lewontin (1929-), ambos de orientación marxista —especialmente el segundo— han sido extraordinariamente críticos con la *sociobiología*[18] de su colega de Harvard Edward O. Wilson (1929-), un intento serio —aunque no sea definitivo ni el primero, pues la idea es del propio Darwin— de estudiar las bases biológicas del comportamiento social, así como con otros biólogos evolucionistas como Richard Dawkins (1941-). En sus críticas, Gould y Lewontin —que no perdonaron a Wilson su sentencia sobre el marxismo (*'wonderful theory, wrong species'*)— parecen pensar que la mente y la psicología humanas no han evolucionado como el resto del organismo y que deben obedecer, por así decirlo, a una epistemología más elevada. Pero no es así: como simple ilustración, basta observar que muchos aspectos de la psicología evolucionista —al contrario que el psicoanálisis freudiano— son refutables en el sentido de Popper y por tanto contrastables científicamente. Por ejemplo, resulta difícil comprobar cuantitativamente la validez del complejo de Edipo, pero es muy sencillo confirmar que los rostros simétricos resultan sexualmente más atractivos que los que no lo son.

Lo sospechoso de Gould y Lewontin, dos pesos pesados en su campo, es el carácter personal y apriorístico de sus ataques, que en su momento traslucieron una componente dogmática y no sólo discrepancias científicas. Es curiosa la devoción que esta postura ha generado en algunos círculos autocalificados como *progresistas*. Pues en el carácter de su crítica a Wilson, Dawkins o al pensador Daniel C. Dennet, por ejemplo, a quienes Gould, Niles Eldredge y otros tildan despectivamente de 'ultradarwinistas', cabe percibir el trasfondo de otro fundamentalismo —o, mejor, del mismo de siempre con otros ropajes. Quizá pueda parecer excesivo hacer este reproche a científicos como Gould, que se ha distinguido especialmente en el revocamiento de leyes 'creacionistas' en Estados Unidos como las de Arkansas de 1981 y Luisiana de 1982. Pero, ¿acaso se les ocurriría llamar 'ultranewtonianos' a quienes reconocen la ley de la gravitación con todas sus consecuencias? Nos guste o no —éste, hay que insistir, es otro asunto— no está en nuestra mano aceptar la ley de la gravitación de Newton para el movimiento planetario y dejarla en suspenso, por ejemplo, cuando se trata de mover un gran peso porque nos molesta el esfuerzo que cuesta arrastrarlo. Pero, *mutatis mutandis*, éste es el análogo en las leyes de la mecánica de lo que Gould y otros biólogos *conservadores* pretenden aquí: circunscribir el dominio de aplicabilidad de la teoría de la evolución a unos límites convenientes, descalificando con el epíteto 'ultradarwinianos' a quienes la aceptan sin más, sin limitar *a priori* su

[18] Véase E.O. Wilson, *Sociobiology: The New Syntesis* (1975) y su premio Pulitzer *On Human Nature* (1978). Gould criticó la sociobiología y a Wilson en varios de sus libros, al igual que Lewontin, quien lo hizo en particular en *The doctrine of DNA, Biology as Ideology* (1991); el capítulo *A Story in Textbooks* podría igualmente titularse como el 'anti-Wilson'.

dominio de aplicación. Sin embargo, *si queremos corregir los aspectos menos nobles de nuestra naturaleza es preciso comenzar por reconocerlos*: a nadie se le ocurre limitar la aplicabilidad de las leyes de Newton al sistema solar pretendiendo que así se ahorrará los posibles inconvenientes del rozamiento. No podemos ignorar las leyes de la naturaleza, aunque ésta sea ajena a nuestros deseos o esperanzas. Darwin no es responsable de las implicaciones de la teoría de la evolución por haber puesto de manifiesto el mecanismo que la produce, de la misma forma que no cabe responsabilizar a Newton de los daños de las guerras porque sus leyes determinen la trayectoria de los proyectiles. *La validez de una teoría no depende del uso que de ella se haga, ni éste condiciona la vigencia de las leyes de la naturaleza que describe.*

El asunto tiene considerable calado, no sólo científico, lo que explica la virulencia que en su día tuvo la polémica, que aún continúa. Dennet tituló uno de sus libros *Darwin's dangerous idea* (1995) y, efectivamente, las ideas de Darwin y sus consecuencias son peligrosas para cualquiera que desee dictaminar apriorísticamente sobre la naturaleza del hombre, su comportamiento y su lugar en el universo. Por ello, de la misma forma que se tilda de fundamentalistas a quienes critican la validez de la teoría de la evolución en favor del creacionismo bíblico o de su moderno disfraz, el 'diseño inteligente'[19], cabría hablar igualmente de fundamentalismo en quienes sólo aceptan la teoría de la evolución 'dentro de un orden', es decir, mientras alguna de sus consecuencias no ponga en tela de juicio sus preconcepciones sobre los seres humanos y su naturaleza. El apriorismo de estas creencias las hace inflexibles y, aunque en este caso se trate de devociones laicas, no resultan por ello menos dogmáticas. Al fin y al cabo, como decía Voltaire, "la fe consiste en creer lo que la razón no cree". En la actitud de quienes así piensan hay un intento, quizá inconsciente, de 'matar al padre', en la medida en la que las ideas de Darwin y sus consecuencias pudieran ir en contra de esas convicciones, tan íntimas como por ello

[19]Los partidarios del 'diseño inteligente' sostienen que la vida presenta aspectos de una *complejidad irreducible* (*i.e.*, tales que la eliminación de una componente cualquiera de un organismo lo haría inviable), por lo que la vida no podría ser resultado de la evolución y requeriría un creador-diseñador inteligente. Al margen de las refutaciones científicas que invalidan esa visión del creacionismo, hay una bien simple al alcance de cualquiera: es fácil observar que, en general, ese diseño no es lo suficientemente bueno para la supuesta finalidad que lo motivó. Si el diseño fuera verdaderamente inteligente, el resultado sería mucho mejor: nuestra columna vertebral, por ejemplo, resultado de la evolución de la postura cuadrúpeda a la bípeda, hubiera sido menos propensa a producir lumbalgias. Esta objeción es análoga a la que se puede aplicar a quienes afirman comunicarse con el más allá: si esa comunicación fuera real, los mensajes recibidos serían clarísimos, con la extensión necesaria y perfectamente elaborados, no reducidos a unas palabras tan crípticas y escasas como las obtenidas en una sesión de espiritismo consultando a la *ouija*. Si el diseño fuera inteligente, el resultado estaría más conseguido; sin embargo, no hay diseño ni finalidad en la evolución. El biólogo hispano-estadounidense Francisco Ayala llega aún más lejos: según él, la teoría de la evolución sería un 'regalo' de la ciencia a la religión porque resolvería el problema del dolor, cuya existencia sería ajena a la divinidad y resultado de que la evolución no es 'inteligente'.

incuestionables. Los que cabría justamente denominar *creacionistas progresistas* o *evolucionistas conservadores*, dependiendo de dónde se quiera poner el énfasis, defienden la evolución de nuestro cuerpo, pero no están igualmente dispuestos a aceptar algunos aspectos de la de nuestra mente. Por ello, al estrechar el dominio de aplicabilidad de la evolución, incurren en otro creacionismo, el que afecta a las áreas que desean *proteger de ella*. Como se ha dicho, la razón de esa actitud es tan sencilla como importantes son sus implicaciones. Pues si nuestra estructura mental y nuestro comportamiento siguen —al menos en parte— unas pautas marcadas por la componente biológica de la naturaleza humana, fruto de la evolución, todo sistema social o político que requiera una supuesta maleabilidad de esa naturaleza para su éxito, y que ignore la considerable rigidez biológica de los *patrones de conducta de los seres humanos, sus condicionantes y sus aspiraciones*, estará condenado a generar un elevado grado de infelicidad e incluso al fracaso a largo plazo[20].

[20] Y así, para evitar la conclusión que no se desea aceptar, se niega la premisa. Un ejemplo, sólo aparentemente lejano de las implicaciones del problema, en este caso políticas, puede servir para ilustrarlo. Tras el derrocamiento del muro de Berlín en 1989 y el desmoronamiento de la URSS, el secretario general del partido comunista de España, Santiago Carrillo, afirmó en una entrevista televisada que "el comunismo no ha fracasado porque, realmente, nunca existió" (*sic*), implicando —prudentemente *a posteriori*— que el sistema político-social que se había aplicado en todos los países del Este era sólo una corrupción del ideal comunista. Pero el *sufrimiento humano no puede justificarse por la supuesta pureza de los ideales de quienes lo causan*: como bien dicen los anglosajones, *the devil is in the detail*. Y, como comentó Albert Camus (1913-60) sobre quienes se negaban en Francia a ver la realidad, *"toute idée fausse finit dans le sang, mais il s'agit toujours du sang des autres. C'est ce qui explique que certains de nos philosophes se sentent a l'aise pur dire n'importe quoi"*. Lo que la Historia refleja sobre el comunismo de los países de la Europa del Este —donde gobernaba— es, probablemente, algo muy distinto: su caída no fue resultado de la aplicación incorrecta del ideal comunista, sino que fueron las limitaciones intrínsecas del *socialismo real* las que acabaron determinando su fracaso. Esta variante del totalitarismo, contraria en algunos aspectos a las aspiraciones innatas —no *reeducables à la* Lamarck— de los seres humanos, sólo pudo mantenerse en Europa por medio de férreas dictaduras hasta que la globalización informativa y otros factores internos y externos las hicieron insostenibles. De hecho, tras los inicios de la información global, la caída del comunismo en los países del Este era previsible para cualquier observador sin prejuicios ideológicos que los conociera y hubiera hablado con sus gentes (aunque algunos años antes, aún bajo la censura informativa, la situación fuese menos clara: basta leer el libro admonitorio de Jean Francois Revel (1924-06) *Comment les démocraties finissent*, de 1983). Lo sorprendente del fin del comunismo en la Europa del Este fue la extraordinaria velocidad del derrumbamiento, una muestra —en particular— del poder de la información global. Por parecidas razones cabe prever que China seguirá, a medio plazo, un camino semejante al de la URSS (fraccionamiento incluido) aunque, paradójicamente, el confucionismo de la sociedad china que tanto trató de erradicar Mao Ze Dong podría prolongar la supervivencia de lo que hoy subsiste del comunismo chino. Verosímilmente, los cambios en China desencadenarán la caída del comunismo hereditario de Corea del Norte, al igual que la *perestroika* en la URSS y la pérdida de control sobre sus *satélites* europeos propiciaron el fin de sus respectivas dictaduras comunistas. Todo ello, claro está, si las imprevisibles consecuencias del terrible aumento de la población mundial no hacen imposible

La causa de la resistencia a aceptar la teoría de la evolución con todas sus consecuencias recuerda —*mutatis mutandis*— la actitud de muchos filósofos postmodernos respecto a la ciencia. También aquí la crítica viene de sectores supuestamente progresistas, que no sólo insisten en la posible falta de objetividad de los científicos —algo tan obvio como legítimo es criticar sus limitaciones, prejuicios o intereses particulares— sino que también cuestionan la racionalidad de la propia ciencia como fuente objetiva de conocimiento, defendiendo un relativismo científico que, éste sí, ya no es aceptable. El influyente libro de Thomas S. Kuhn (1922-1996) sobre *The structure of scientific revolutions* (1962, 1969) —precursor de ese relativismo— y, sobre todo, el famoso *affaire Sokal* y la *guerra de las ciencias* de la segunda mitad de los noventa acuden enseguida a la mente. Pero también lo hace el añorante comentario con el que Jean Bricmont y Alan Sokal concluyen su libro *Impostures intellectuelles* (1997) dedicado a desenmascarar la citada posición de numerosos filósofos *postmodernos* sobre la ciencia: "hubo [un tiempo] en el que pensadores y filósofos estaban inspirados por las ciencias, pensaban y escribían claramente, buscaban comprender el mundo natural y social, se esforzaban en transmitir sus conocimientos a su conciudadanos y ponían en cuestión las iniquidades del orden social: ésa era la época de las Luces". En la *guerra de las ciencias* ha habido también algún científico cuyo *progresismo* le ha forzado a alinearse con los filósofos postmodernos. No es el caso de Gould, aunque quizá tampoco deba sorprender que, sin ser un relativista respecto al conocimiento científico, no tuviera una actitud muy definida al respecto. Sin embargo, y parafraseando a Mark Twain cuando ironizaba sobre las prematuras noticias sobre su muerte, las limitaciones de la ciencia han sido muy exageradas[21]. Pues, incluso si se considera que hay problemas que la ciencia no puede resolver, ¿qué misteriosa razón hace

toda predicción: todo historicismo es difícil y, como decía Popper, su 'pobreza' es manifiesta.

La caída del comunismo ha supuesto la pérdida del contrapeso natural del capitalismo occidental, más en línea con el egoísmo biológico de los seres humanos. Y aunque la actual crisis económica no constituye el fracaso de las democracias occidentales que algunos han deseado ver, sí es una buena muestra de los lamentables excesos que el capitalismo puede producir cuando, guiado por el natural egoísmo humano, fallan los mecanismos que deberían prevenirlos.

[21] Otra cosa muy distinta son nuestras propias limitaciones. Es bien posible que, de la misma forma que no cabe enseñar química orgánica a un chimpancé por inteligente que sea, las limitaciones de nuestra mente acaben poniendo un límite al avance del conocimiento, incluso con la ayuda de los ordenadores. Podría suceder en el futuro con nuestro cerebro lo que ya se puede observar hoy con los récords olímpicos, cuya mejora es asintótica. La velocidad de un corredor, por ejemplo, depende de su capacidad de quemar calorías con rapidez para obtener la energía cinética que adquiere al correr. Esa capacidad está limitada biológicamente, por lo que ya no cabe esperar que velocistas y otros atletas mejoren mucho más sus marcas, que se decidirán por fracciones de segundo cada vez más minúsculas: los juegos olímpicos resultarán, en este aspecto, cada vez menos interesantes. Por lo que se refiere a nuestro cerebro es seguro que, aunque no sea posible cambiarlo, todavía podemos aprovecharlo mucho mejor. Es probable, sin embargo, que su capacidad sea insuficiente para alcanzar la posible 'teoría del todo'.

suponer que otras disciplinas podrían tener éxito allí donde la ciencia ha fracasado?

8. Evolución, ciencia y religión

Gould acuñó el acrónimo NOMA (n*on*-o*verlapping* ma*gisteria*) para separar el dominio de actuación de la ciencia del de otros magisterios, de forma que éstos no pudieran ser afectados por aquélla. Gould se refería expresamente a la religión en su ameno artículo de 1997 en *Natural History* —dedicado a la memoria de su amigo Carl Sagan (1934-96)— aunque quizá también tuviera *in mente* otras *creencias*. Gould recordaba con humor cómo en 1984, en una conferencia en Roma sobre el invierno nuclear organizada por la Academia Pontificia, él —un judío agnóstico— había tranquilizado a unos científicos —jesuitas— sobre la posible repercusión del cristianismo en la teoría de Darwin y recíprocamente. La respuesta de Gould fue tajante: "la evolución es, a la vez, cierta y consistente con las creencias religiosas". La religión y la ciencia, teoría de la evolución incluida, determinan magisterios cuyos dominios de aplicación no se solapan. En palabras de Gould: "la ausencia de conflicto entre la ciencia y la religión es consecuencia de la falta de solapamiento entre sus respectivos dominios de competencia profesional: ciencia en la formación empírica del universo, y religión en la búsqueda de valores éticos adecuados y en el sentido espiritual de nuestras vidas". Gould continuaba citando un documento de Juan Pablo II titulado *La verdad no puede contradecir la verdad*, donde el Papa defendía (el 22-X-96) la consistencia de la teoría de la evolución con la doctrina de la Iglesia. Y respecto a la existencia de científicos con convicciones religiosas, Gould afirmó en otro lugar: "salvo que al menos la mitad de mis colegas sean unos zopencos, no puede haber conflicto —en el ámbito más puro o más empírico— entre ciencia y religión".

Por supuesto, la teoría de la evolución no es contraria a la fe religiosa: nada impide creer, en particular, que la evolución es el mecanismo utilizado por Dios para dar vida a las distintas especies. Como el propio Darwin afirmó en el *Origen*: "No encuentro ninguna razón de peso para que las ideas expresadas en este volumen puedan herir el sentimiento religioso de nadie. Es oportuno recordar, para ilustrar cuán pasajeras son estas impresiones, que el mayor descubrimiento jamás hecho por el hombre, la ley de la gravitación, fue también atacado por Leibniz como 'destructor de la religión natural y, por extensión, de la revelada'. Un conocido autor a la par que clérigo me ha escrito que 'ha llegado a apreciar paulatinamente que tan noble es la idea de una Deidad creadora de unas pocas formas iniciales capaces de desarrollarse en otras y necesarias formas, como creer que Él necesita un nuevo acto de creación para llenar los huecos producidos por las acciones de Sus leyes[22]'". De forma análoga se había expresado antes el gran Isaac Newton (1642-1717)

[22] *"I see no good reason why the views given in this volume should shock the religious feeling of anyone. It*

quien, al contrario que Darwin, era profundamente religioso, misógino, nada humilde y de fuerte carácter[23]. Newton, que escribió sobre asuntos bíblicos tanto como sobre física (*filosofía natural*), afirmó en su obra magna, los *Principia* (1687), que "este sistema del sol, planetas y cometas, bello sobremanera, sólo podría proceder de la dirección y la autoridad de un Ser inteligente y poderoso[24]". Darwin, no obstante, fue perdiendo paulatinamente la fe, hasta volverse definitivamente agnóstico con motivo de la temprana muerte de su hija más querida, Annie, en 1851.

Es preciso reconocer, sin embargo, que el dominio del magisterio religioso ha ido reduciéndose con el paso del tiempo, conforme los fenómenos para los que proporcionaba la única explicación o interpretación disponible han ido encontrando una descripción científica. Quizá por eso no se cite el anterior párrafo de Newton en defensa del creacionismo, pues actualmente se sabe cómo se formó el sistema solar, bajo la acción de la gravedad a partir de nubes de gas interestelares, y hasta existe una teoría estándar —el *Big Bang*— del origen del universo. Pero también hoy, al contrario que en tiempos de Darwin, se conocen las leyes de la genética mendel-morganiana, la doble hélice y demás estructuras que están detrás de la herencia genética, de sus variaciones y de la acción de la selección natural, lo que debería desplazar al creacionismo como alternativa racional a la evolución darwiniana de las especies. Hoy no es asunto de la religión —como lo fue durante siglos— explicar el mundo natural: ése es el dominio de la ciencia donde, por cierto, ha tenido considerable éxito. Los dominios de los magisterios de la ciencia y de la religión ya casi no se solapan *de hecho*: la ciencia ha ido haciendo suyo el dominio de la naturaleza desplazando de él a la religión[25]. El Génesis y otros relatos análogos que describen el origen del mundo

is satisfactory, as showing how transient such impressions are, to remember that the greatest discovery ever made by humans, namely the law of the attraction of gravity, was also attacked by Leibniz as 'subversive of natural, and inferentially of revealed, religion'. A celebrated author and divine has written to me that he 'has gradually learnt to see that it is just as noble a conception of the Deity to believe that He created a few original forms, capable of self-development into other and needful forms, as to believe that He required a fresh act of creation to supply the voids caused by the actions of His laws' ".

[23]La diferencia entre las personalidades de Darwin y Newton queda bien reflejada por sus tumbas, ambas en la abadía londinense de Westminster: Darwin está enterrado bajo una humilde lápida que contrasta con el imponente túmulo de Newton, no lejos de ella. Pero esa sencillez no da idea del juicio de la época tras la muerte de Darwin: sus ideas, tan contrarias a la sociedad victoriana, habían sido ya absorbidas por el *establishment*. Dos duques y un conde, representando al gobierno de Gladstone en el funeral, ayudaron a llevar el féretro de Darwin, y *The Times* escribió: "la abadía [de Westminster] necesita más a Darwin que éste a ella".

[24] *"this most beautiful system of the sun, planets, and comets could only proceed from the counsel and dominion of an intelligent and powerful Being".*

[25]R. Dawkins, en su libro *The God delusion* (*El espejismo de Dios*, 2006), argumenta que incluso la verosimilitud de los dogmas religiosos o la existencia de Dios puede ser objeto de análisis científico.

en la mayoría de las religiones han pasado a ser descripciones alegóricas perdiendo toda posible interpretación literal. Sin embargo, hay importantes áreas que están al margen de la ciencia: la ética, aunque puede y *debe* estar *informada* por el conocimiento científico —de la evolución y la etología en particular— no está *determinada* por ese conocimiento.

Pero volvamos a Gould, pues su postura ante la evolución es de especial interés por su decidido agnosticismo y por no representar un caso aislado. Su insistencia en la absoluta contingencia de la evolución[26] al margen de todo fenómeno de convergencia evolutiva, en que hay características fenotípicas[27] que la evolución no explica, así como su crítica

[26]Gould afirmaba que si se rebobinara la cinta de la evolución y se iniciara de nuevo, el resultado sería completamente diferente, 'sin que aparecieran seres humanos y menos aún matemáticos' (*'re-run the tape of life, then no humans, let alone mathematicians'*), defendiendo aparentemente una contingencia radical de la evolución. La cuestión aquí es de grado, pues la evolución tiene una obvia componente aleatoria: como el propio Darwin —una vez más— ya había anticipado en el *Origen*, la desaparición de una especie puede resultar definitiva aunque vuelvan a darse las condiciones que existían cuando apareció: "podemos comprender con claridad por qué una especie, una vez perdida, nunca volvería a aparecer, incluso si se dieran de nuevo idénticas condiciones de vida, orgánicas e inorgánicas" (*"we can clearly understand why a species when once lost should never reappear, even if the very same conditions of life, organic and inorganic, should recur"*).

La contingencia extrema de Gould choca con los abundantes fenómenos de convergencia evolutiva que ya hemos mencionado y que, aunque por supuesto acepta, tiende a soslayar. Así pues, una nueva evolución daría lugar a seres no radicalmente distintos a lo visto tras las grandes extinciones de la historia de la vida, que son lo más parecido en la realidad al gran *gedanken experiment* que se plantea Gould. No se puede saber si, tras 3500 Ma de pasar de nuevo la *'evolutionary tape'*, la evolución habría producido otra vez matemáticos. Pero, con las adecuadas condiciones geológicas, sí habría ojos, seres acuáticos, voladores y terrestres y, si se desarrollara un buen cerebro, seres tan pensantes como los humanos. Esta perspectiva es compatible con la contingencia del párrafo citado de Darwin, pero mucho menos con la más radical de Gould.

[27]Gould y Lewontin, en su artículo *The spandrels of San Marco and the Panglossian paradigm: a critique of the adaptationist programme* (*Las pechinas de S. Marcos y el paradigma panglosiano: una crítica del programa adaptativo*, 1979) donde critican el adaptacionismo, dieron a *'spandrels'* el significado de pechinas, utilizando, por tanto, una inadecuada metáfora arquitectónica. Pues las pechinas son, precisamente, la solución (introducida por primera vez en la iglesia de Santa Sofía de Constantinopla, no en la de San Marcos de Venecia) que permite la transición o *adaptación* de una planta cuadrada a la cúpula semiesférica que está sobre ella, y no un capricho que la evolución —arquitectónica en este caso— no podría justificar (como quizá sería el caso de las enjutas, que es lo que son los *spandrels*). Los mosaicos que rellenan las pechinas no aparecieron con ninguna *finalidad* arquitectónica, que es la metáfora que Gould y Lewontin usan para criticar el adpatacionismo en la evolución, pues los bellos mosaicos son estructuralmente inútiles; fueron las pechinas, por el contrario, las que permitieron culminar la iglesia con una cúpula semiesférica.

El *paradigma panglosiano* o *adaptacionista* en la evolución establecería que todos los caracteres tienen una razón de ser y que ninguno es fruto de la casualidad. Algo que, por cierto, Darwin tampoco preconizó por lo que, en lo que las ideas de Gould y Lewontin tengan de cierto en este punto, se adelantó a ambos. Gould y Lewontin aludían en el título de su trabajo al preceptor del joven Cándido, el Dr. Pan-

visceral a la sociobiología, hacen de Gould un darwinista *malgré soi*, un calificativo cuya validez me confirmó Richard Dawkins hace poco en el curso de una interesante conversación. Quizá eso explique la paradoja que representa que a veces los creacionistas citen precisamente a Gould *en contra* de la evolución. Pero como sostiene Wilson en *Consilience*, un libro que trata de superar la dicotomía de las 'dos culturas', la unidad del conocimiento —a la que alude el antiguo vocablo inglés del título— no admite fronteras. Y la crítica de Gould a la sociobiología refleja un intento de establecer un dominio, aislado de la evolución, al que se querría proteger aplicando su propio principio —NOMA— para que la evolución no tuviera nada que decir sobre aquél. En cualquier caso, aquellos que, en el fondo, querrían poner a los seres humanos en una categoría especial, *off-limits* para la ciencia en alguno de sus aspectos, deberían recordar la críptica frase que el propio Darwin dejó plantada en el *Origen*, como bandera ondeante sobre la cumbre de su propio libro, para advertir que él ya era consciente de que por medio de su obra "se aclararía el origen del hombre y su historia". Darwin fue prudente en el *Origen* pero, como demuestran sus *notebooks*, para entonces ya era perfectamente consciente de que la teoría de la evolución tenía consecuencias para el hombre y la sociedad[28] . Con toda probabilidad, Darwin no quiso ir más allá para no provocar polémicas adicionales que desviaran la atención de las ideas del *Origen*, de por sí suficientemente controvertidas y de cuya fundamental importancia no tenía ninguna duda[29].

gloss, para quien todo en la naturaleza tenía una buena razón de ser; Voltaire, a su vez, había satirizado en el *Cándido o el optimismo* (1759) a Leibniz, para quien este mundo era el mejor de los posibles.

[28]En la penúltima página del *Origen* Darwin afirmó, escueta y proféticamente: *"In the distant future I see open fields for far more researches. Psycology will be based on a new foundation, that of necessary acquirement of each mental power and capacity by gradation. Light will be thrown on the origin of man and his history"*. Es bien posible que tampoco quisiera ir más lejos para no ofender a los creyentes, incluida su mujer, a quien le entristecía pensar que no podría encontrarse con su marido en la otra vida por no serlo.

Doce años tras el *Origen* aparece *El origen del hombre* (*The Descent of Man*). Para entonces la teoría de la evolución ha ganado terreno y Darwin, pese a que nunca perdería sus habituales reticencias, se siente ya más libre para mostrar abiertamente la continuidad entre el hombre y los animales no humanos. Por eso afirma en la Introducción, para disipar toda duda: *"During many years I collected notes on the origin or descent of man, without any intention of publishing on the subject, but rather with the determination not to publish, as I thought that I should thus only add to the prejudices against my views. It seemed to me sufficient to indicate, in the first edition of my 'Origin of Species', that by this work "light would be thrown on the origin of man and his history"; and this implies that man must be included with other organic beings in any general conclusion respecting his manner of appearance on this earth. Now the case wears a wholly different aspect [...]"*.

[29]Prueba de ello es que antes del *Origen*, en 1844, Darwin había entregado a su mujer un resumen de sus ideas (230 págs.) con instrucciones de reservar 400 libras de su patrimonio para publicarlo si él fallecía antes de culminar su gran obra. Darwin nunca completó ese gran tratado: es bien sabido que el *Origen* sólo pretendía ser un *Abstract*, un resumen cuya publicación se precipitó al recibir Darwin (el 11-VI-1858)

Permítaseme concluir esta pequeña digresión sobre ciencia, religión y otros dogmas con un comentario pues, llegado este punto, es posible que se crea que estoy haciendo de la ciencia una nueva religión. No es así: la ciencia *no* es una religión. Confundir una con otra es no distinguir entre el comportamiento de un científico dedicado a la observación o la medida de un fenómeno en un laboratorio, y el de un creyente en un templo o lugar sagrado, donde la fe es un elemento esencial. De hecho, la fe religiosa da las respuestas anticipadamente; la ciencia se basa en la experimentación y en el método científico precisamente porque, antes de realizar una observación o un experimento, no se sabe cuál va a ser el resultado pues, de otro modo, serían innecesarios. En la ciencia no hay dogmas inmutables, sólo teorías mejor o peor fundamentadas, aunque hoy las haya muy bien establecidas. Una teoría en vigor puede ser total o parcialmente refutable en el futuro, de lo que hay abundantes ejemplos. El progreso científico se mide —objetivamente— por la capacidad de la ciencia para describir cada vez mejor la Naturaleza; en contraste, los dogmas religiosos se mantienen prácticamente inalterados a lo largo del tiempo. La ciencia no da ni pretende proporcionar el consuelo de la fe, sin la cual no hay religión posible; sólo la satisfacción que produce el conocimiento, aunque sea parcial. Los seguidores de todo dogma tienden a aceptarlo como verdad absoluta, delegando en él o en el grupo del que emana la autoridad última; la ciencia, por el contrario, sólo admite los resultados de la aplicación del método científico, observación y experimentación incluidas, *aunque* a *medio* plazo se cometan errores en la búsqueda de las leyes de la Naturaleza y a *corto* plazo le puedan ser aplicables las críticas de Kuhn sobre la componente social del consenso científico. De hecho, la ciencia presenta la peculiaridad única de que el acuerdo entre los científicos es independiente de sus creencias y que, cuando hay discrepancias científicas, no guardan relación alguna con su posible religión. Por eso no existe ciencia cristiana, budista o musulmana, sino ciencia a secas. Así pues, y para concluir este párrafo, desearía resaltar que lo único que cabe deducir de los anteriores es la prevalencia de las leyes naturales, de la evolución en este caso, sobre nuestras preconcepciones y deseos, al igual que lo falaz de todo *wishful thinking*. Reconocer este hecho presenta, por otra parte, una ventaja, aunque ciertamente no haya sido buscada: puestos a delegar autoridad, es mejor hacerlo en la Naturaleza *precisamente* porque sus *leyes* están más allá de nuestro control, fuera éste pretendidamente altruista u ocultamente interesado. En particular, ¿por qué habrían de merecer más confianza los *dictámenes* de tantos pensadores aprioristas —o políticos— sobre la naturaleza humana, a menudo con lamentables consecuencias, que la visión que

un manuscrito de Wallace con ideas muy semejantes. Darwin comentó: "nunca ví una coincidencia más asombrosa; si Wallace hubiera tenido mi esquema de 1842 [se refiere a un primer esbozo de 35 páginas a lápiz que había enviado ese año al geólogo Charles Lyell] no podría haberlo sintetizado mejor" (*"I never saw a more striking coincidence; if Wallace had my MS sketch written out in 1842, he could not have made a better abstract!"*).

de ella pueden proporcionar la medicina y la biología evolutiva?

Queda por retomar, en este contexto, la cuestión del diálogo entre ciencia y religión; ya mencioné antes la opinión de Gould, la de los magisterios independientes o NOMA. Creo, sin embargo, que la situación es más próxima a la opinión de Steven Weinberg, que se sitúa entre la posición de Gould y la más extrema de Dawkins citada en la nota 25, aunque probablemente más cercana a la de éste. En una reunión de 1999 de la Sociedad Americana por el Avance de la Ciencia, en una ponencia en la que se preguntaba si el universo ha sido realizado de acuerdo con un plan (*is there a designer universe?*) y respondía negativamente, Weinberg afirmó: "Estoy completamente a favor del diálogo entre ciencia y religión, pero no del diálogo constructivo. Uno de los grandes éxitos de la ciencia ha sido, si no hacer imposible que las personas inteligentes sean religiosas, al menos permitir que no lo sean. No deberíamos renunciar a este logro"[30]. En los últimos años, además, la evolución ha dado un paso que cuestiona directamente la parcelación que supone NOMA: se empieza a considerar que las religiones presentan ventajas evolutivas para nuestra especie por lo que, quizá, su temprana aparición y continuada persistencia podría explicarse como resultado de la propia selección natural.

9. Etología y comportamiento humano: evolución y civilizaciones

Las consideraciones anteriores sobre la evolución, que se pueden resumir en que las ideas evolutivas *también* se aplican al hombre en su conjunto, permiten analizar algunas consecuencias de la evolución para el comportamiento de los seres humanos y su posible repercusión en las sociedades modernas. Pues una cuestión es el necesario debate sobre la ética de los posibles usos del conocimiento científico y otra cosa es pretender —inútilmente, por lo demás— que los seres humanos y su comportamiento están al margen de las consecuencias de la evolución.

La etología, la ciencia del comportamiento animal, fue oficialmente consagrada con la concesión del Nobel de Fisiología o Medicina de 1973 a sus tres fundadores, los vieneses Konrad Zacharias Lorenz (1903-1989) y Karl von Frisch (1886-1982) y el holandés Nikolaas Tinbergen (1907-88) aunque, como hemos visto, sus antecedentes se remontan al propio Darwin. Frisch descubrió el sistema de comunicación de las abejas; Tinbergen (que dirigió la tesis de R. Dawkins) estudió los instintos. Por su parte, Lorenz observó que en

[30]Dice Weinberg en el artículo del *New York Review of Books* (del 21-X-1999) en el que reproduce su ponencia: *"In an e-mail message from the American Association for the Advancement of Science I learned that the aim of this conference is to have a constructive dialogue between science and religion. I am all in favor of a dialogue between science and religion, but not a constructive dialogue. One of the great achievements of science has been, if not to make it impossible for intelligent people to be religious, then at least to make it possible for them not to be religious. We should not retreat from this accomplishment".*

los primeros momentos de su vida los animales se fijan a su entorno inmediato, generalmente a su madre, aunque no sólo hay fijación filial; la hay también de otros tipos. Son famosos los experimentos en los que Lorenz consiguió que gansos recién nacidos le siguieran ciegamente, creyéndolo su madre, porque había logrado que se fijaran a él poniéndose junto a huevos de ganso al eclosionar. Lorenz tenía una especial devoción por los gansos como consecuencia de haber leído en su infancia *Las aventuras de Nils Holgersson*, las de un niño que volaba transportado por un ganso, de Selma Lagerlof, uno de los primeros premios Nobel (1909) de literatura. Podría resultar reconfortante pensar que los seres humanos estamos muy por encima de los procesos de impronta (*imprinting*) que condicionan el comportamiento de los gansos, pero no hay razón para ello: los mecanismos de fijación o apego no están limitados a las aves. Esos mecanismos moldean o troquelan —de acuerdo con el término original de Lorenz (*Prägung*, 1935)— a muchos seres vivos: Lorenz dejó su impronta y 'troqueló' a sus gansitos de forma que lo identificaran con su madre para siempre. Lorenz lo consiguió en minutos; otros casos pueden requerir espacios de tiempo más largos, y ni siquiera la fijación tiene que ser a algo vivo. En cualquier caso, las raíces del comportamiento animal son claramente evolutivas; el propio Darwin dedicó el cap. V de *El origen del hombre* a estudiar 'el desarrollo de las facultades intelectuales y morales'. Así pues, aunque en su día se criticó a Lorenz por extender algunas de sus conclusiones al comportamiento humano, no hay ninguna razón —salvo, una vez más, el antropocentrismo— para situarnos en una categoría completamente distinta.

La impronta no debe ser confundida con el aprendizaje: éste es cosa del individuo y lo aprendido se puede olvidar, mientras que la fijación, por estar determinada por el instinto, afecta a la especie, se produce en un período crítico, generalmente al comienzo de la vida, y produce fuertes vínculos que son en gran parte irreversibles. Nótese, además, que lo inevitable es la existencia del mecanismo instintivo que genera el vínculo, pero no la naturaleza de éste: los gansitos —por ejemplo— pudieron fijarse a su madre o a Lorenz, dependiendo de quién estuviera próximo a ellos al nacer. En el caso de los seres humanos hay ejemplos de apego incuestionables, como el que se da en los mamíferos entre padres —sobre todo madres— e hijos, cuyo origen evolutivo es indudable: de no existir esa fijación filial, los recién nacidos tendrían nulas posibilidades de sobrevivir y de transmitir a su progenie la ausencia de esa fijación. Pero también hay otros momentos para ella, como la pubertad. Los seres humanos tienen, además, inevitables fijaciones al entorno cultural, que se establecen en la primera parte de su vida. "Los historiadores tendrán que aceptar el hecho de que la selección natural determinó la evolución de las culturas de la misma forma que lo hizo con las especies" afirmó Lorenz en su libro *Sobre la agresión* (1963). De hecho, las culturas exhiben variación acumulativa, competición y —en buena medida— heredabilidad, por lo que la evolución cultural puede estudiarse desde la perspectiva de

la selección natural.

Puesto que las grandes culturas determinan las grandes civilizaciones, no es sorprendente que en un sentido amplio la Historia sea la historia —yo diría que la *evolución*— de las civilizaciones, como ya señaló en su día Arnold J. Toynbee (1889-1975) en su monumental *Estudio sobre la Historia* (1931-61). Hace algunos años la cuestión ha vuelto a estar de actualidad tras un influyente ensayo del profesor de Harvard Samuel P. Huntington (1927-08), *The Clash of Civilizations?* (1993), publicado en la revista *Foreign Affairs* y convertido en libro tres años más tarde. La tesis de Huntington[31], según la cual los conflictos futuros serán el resultado de choques entre fronteras culturales más que nacionales es, pues, consecuencia de la especial fijación de los seres humanos al entorno de los primeros años de su vida, que prácticamente determina la civilización a la que pertenecerán.

No es fácil saber, en ausencia de un Darwin de las culturas, por qué existen las seis u ocho grandes civilizaciones que considera Huntington para su análisis (occidental, islámica, china y japonesa, hindú, africana, etc.) y por qué no se han desarrollado, por ejemplo, medio centenar de ellas (la clasificación más fina de Toynbee considera veintitantas civilizaciones). Como en los fenómenos de convergencia evolutiva, es más que probable que el 'espacio de fases de las civilizaciones' o espectro de las grandes culturas posibles sea mucho más reducido de lo que *a priori* se podría pensar y que, en algunos casos, el mapa cultural tenga algunas fronteras fluidas como sucede con las lenguas. No obstante, eso no impide que haya diferencias claras y definidas entre las grandes civilizaciones de igual forma que las hay entre las grandes familias lingüísticas. Por ello, dada la íntima vinculación de la inmensa mayoría de los seres humanos a su propia cultura, la tesis de Huntington —que no parece haber apreciado las raíces biológicas del problema que señala— parece más que razonable. El carácter casi irreversible de toda fijación, en este caso al entorno cultural, es la razón por la que los conflictos entre distintas culturas —o incluso dentro de un mismo credo religioso, como entre sunitas y chiitas— tienen difícil solución, que no cabe buscar en cándidos voluntarismos o en una tan ingenua como vacía 'alianza de civilizaciones', sino en una educación liberal que eleve a los seres humanos por encima de su —nunca mejor dicho— primitivismo congénito. Se trata de compensar la inevitable *fijación* a uno de los grandes bloques culturales con el *aprendizaje* que produce la educación liberal, para suavizar así la rigidez de ese troquelado. Desgraciadamente, la impronta es automática, inevitable y prácticamente irreversible: por eso chinos, hindúes o europeos lo son —y al

[31] La reproduzco a continuación sin traducir, puesto que está sintetizada arriba: *It is my hypothesis that the fundamental source of conflict in this new world will not be primarily ideological or primarily economic. The great divisions among humankind and the dominating source of conflict will be cultural. Nation states will remain the most powerful actors in world affairs, but the principal conflicts of global politics will occur between nations and groups of different civilizations. The clash of civilizations will dominate global politics. The fault lines between civilizations will be the battle lines of the future.*

cabo de pocos años— para el resto de sus vidas. El aprendizaje, por el contrario, requiere considerable esfuerzo.

Por supuesto, las ideas de Huntington recibieron críticas en su día, sobre todo de sectores políticamente correctos y aficionados al *wishful thinking*; demasiadas, cabría decir, como para no haber acertado en lo esencial. Sin embargo, sólo el bengalí Amartya Sen (1933-), premio Nobel de economía (1998) y antiguo Master del *Trinity College* de Cambridge, ha ido al fondo de la cuestión: cómo evitar lo que, para Huntington, es difícil impedir que suceda. En su libro *Identity and violence: the illusion of destiny* (2006), Sen señala que la adscripción a una única identidad cultural es un ingrediente fundamental de la confrontación sectaria, en lo que concuerda con Huntington. Pero, precisamente por ello, la insistencia en la 'amistad entre civilizaciones' como medio para lograr buenas relaciones entre los miembros de diferentes culturas es errónea porque refuerza el carácter unidimensional y divisorio de esa afiliación, por lo que dificulta el diseño de políticas de coexistencia en lugar de facilitarlo. Por eso conviene recordar que, al margen de su vinculación a una cultura, los seres humanos tienen múltiples identidades: nacionalidad, residencia, sexo, grupo social, ideas políticas, profesión, aficiones y otras. Y sólo una identidad absoluta e importante: su condición de seres humanos. Así pues, siempre será erróneo incidir exclusivamente en cualquier identidad, y en especial en una tan importante como la civilización a la que se pertenece, salvo que el énfasis sea en la única que nos es común a todos.

"La presunción de que las personas pueden ser clasificadas atendiendo sólo a su religión o su cultura es la mayor fuente de conflictos potenciales en el mundo contemporáneo", afirma Sen. Como Huntington, Sen no menciona el mecanismo evolutivo que está detrás de la fijación a una civilización determinada. Pero advierte: "la imposición de una única identidad es a menudo una componente esencial de la confrontación sectaria". Por ello, resulta evidente el camino a seguir para evitar ese choque de civilizaciones: no hay que hacer énfasis —por muy bienintencionado que sea— en la adscripción mono-dimensional a una civilización, puesto que así se acentúan las diferencias y se propicia la división y el alejamiento, sino en las muchas y variadas identidades que poseen los seres humanos que diluirían la impronta cultural, lo que mostraría la diversidad y al mismo tiempo la unidad que existe entre ellos, rebajando así el riesgo de conflicto. Nada es más absurdo ni más torpe, por ejemplo, que caracterizar a dos niños como 'cristiano' y 'musulmán', estableciendo así una barrera artificial que separa lo muchísimo que les une como niños y seres humanos. Como dice Sen, "la estrechez de todo pensamiento centrado en las civilizaciones puede ser tan traicionera para programas de 'diálogo entre civilizaciones' (algo que parece estar muy en boga en estos tiempos), como lo es para teorías de 'choque de civilizaciones'... [Los] intentos de lograr una paz global pueden tener consecuencias muy contraproducentes si se basan en una comprensión básicamente ilusoria de los seres

humanos". De otra forma, diría yo: cuando se ignora la componente biológica de nuestra naturaleza. Más Darwin, pues, y menos Rousseau: el infierno está empedrado de buenas intenciones y optimismos sin fundamento[32].

Así pues, los mecanismos de fijación producen vinculaciones culturales en la primera parte de la vida que son difíciles de revertir una vez producidas. La *existencia* de esas vinculaciones es inevitable, pero la *naturaleza* de éstas puede depender de las circunstancias. Esto es algo natural, y en sí no constituye un problema. Lo que es preciso reconocer es que, dado su origen biológico, esas improntas son el resultado de lo más primitivo —por tanto, más irracional— de nuestro ser. Este hecho debe prevenirnos contra los peligros de aceptar esas vinculaciones —sean culturales o de otro tipo— como universales, simplemente por ser las nuestras, lo que inevitablemente nos condenaría a chocar con otros grupos con improntas no menos universales. La adscripción a nacionalismos excluyentes o la pertenencia a grupos violentos de equipos de fútbol, por poner dos ejemplos, sólo son, en realidad, muestras de primitivismo biológico e irracionalidad: la inevitable fijación no ha sido compensada por el oportuno (y liberal) aprendizaje[33]. Las vinculaciones pueden

[32]Es oportuno recordar aquí la fábula de la rana y el escorpión. Éste quiere persuadir a la rana para que le transporte sobre su espalda al otro lado de una charca; para ello le asegura que no le picará pues, si lo hiciera, el escorpión también moriría ahogándose. A mitad de camino, no obstante, el escorpión pica a la rana que, asombrada, le pregunta antes de hundirse con él: "¿por qué lo has hecho? Ahora moriremos los dos". A lo que el escorpión responde, como única y obvia explicación de su comportamiento: "es que así es mi naturaleza".

[33]Un ejemplo cercano —se pueden poner otros— puede servir de ilustración parcial a lo dicho. En España, la transferencia de la educación a las comunidades autónomas y su consiguiente utilización para construir identidades nacionales o autonómicas, más o menos reales o simplemente imaginadas, ha producido considerables recelos entre ellas, tan perjudiciales como antes inexistentes: la creciente insolidaridad con las regiones menos favorecidas económicamente o las 'guerras del agua' son buenos ejemplos de ello. La insistencia en las nuevas identidades no ha generado la esperada (?) armonía, sino división y desconfianzas. Este panorama, consecuencia de haber fomentado durante muchos años en la escuela *autonómica* una excesiva —en tanto que excluyente y no liberal— impronta regional o decididamente nacionalista, era perfectamente predecible: los niños y adolescentes, convenientemente 'troquelados' ('normalizados') en sus escuelas, hace ya tiempo que se convirtieron en adultos. Por otra parte, algunas políticas lingüísticas de comunidades autónomas presentan aspectos que, por conculcar *libertades básicas individuales*, recuerdan —en movimiento pendular— a las del franquismo, como sabe cualquiera que tenga edad suficiente para haberlo sufrido. Es cierto que las situaciones son muy distintas, tanto como lo son entre sí una dictadura y una democracia. Pero, pese a todo, tienen dos aspectos comunes: la conculcación de libertades —repito, *básicas* e *individuales*— que deben ser defendidas, y el talante dogmático de quienes se arrogan el derecho —incluso manipulando el Derecho— de no respetarlas, pues los derechos fundamentales, como su carácter indica, no pueden decidirse por mayoría. Cuando de éstos se trata, el derecho del *individuo* debe prevalecer; su quebranto es la raíz, siempre, de los mayores abusos. La terminología al uso, por cierto, resulta subliminalmente reveladora: las políticas de 'normalización lingüística' presuponen una *anormalidad* en aquéllos cuya lengua materna no es la de los *normalizadores* (de hoy y de ayer), disfunción que, en

ser diferentes, pero el mecanismo que las produce —el de impronta o fijación biológica a un determinado entorno— refleja la base irracional de todas ellas. Y aunque la vinculación a *alguna* cultura es inevitable, la pertenencia a una determinada es azarosa en altísimo grado: depende del lugar donde transcurren los primeros años de la vida. Esta aleatoriedad, que debería bastar para dudar *a priori* de la importancia de la adscripción cultural, no implica, por supuesto, un completo relativismo: las culturas de los pueblos primitivos no son equivalentes a la de la Grecia de Pericles. Pero el hecho de que un único mecanismo biológico —la impronta— pueda producir resultados tan distintos debería ser la base *racional* del *respeto* a todas las culturas. De ahí la importancia de la educación abierta, del imprescindible aprendizaje que ensancha nuestros horizontes y nos permite apreciar otras identidades o puntos de vista e, incluso, cambiar el nuestro: el primitivismo biológico de nuestra naturaleza no es tolerante, pero la educación liberal puede enseñarnos a serlo. *La razón crítica es la única alternativa a toda posible violencia sectaria; la razón debe primar sobre la identidad.*

10. Las sociedades actuales y el futuro

El problema esencial de las sociedades modernas es el enorme desfase existente entre la evolución genética, de lentísimo transcurrir y cuyos mecanismos no han cambiado, y la evolución cultural, cuyo desarrollo es quizá un millón de veces más veloz. Estrictamente hablando, nuestra evolución casi ha dejado de ser biológica para pasar a ser fundamentalmente cultural. De hecho, se ha producido un cambio trascendental en la evolución de la especie humana: en lugar de adaptarse al ambiente 'cambiando' sus genes, nuestra especie modifica ese ambiente de acuerdo con sus necesidades, aunque esa modificación no sea completamente satisfactoria ni se consiga sin pagar un elevado precio en términos de destrucción del entorno natural. Los avances de la medicina y de la técnica, por su parte, han producido un rápido y enorme crecimiento de la población. Pero, pese a todos los avances, nuestra naturaleza biológica sigue siendo la de nuestros antepasados de hace miles de años, cuyos instintos, entonces más adaptados a sus necesidades y a su entorno, continúan rígidamente siendo los nuestros hoy, pese a que ya no son tan adecuados para las extensas y complejas sociedades actuales. La rapidez de la evolución social no ha permitido que

consecuencia, es preciso corregir: *nihil nuovo sub sole.* Y como ya se vio la impronta, una vez producida —conseguida, sería más propio aquí— en los primeros años de la vida, será ya irreversible a menos que los *normalizados* amplíen horizontes pues, casi por definición, el objetivo de *toda* escuela nacionalista es estrecharlos: muchos adolescentes así educados saben por dónde pasa un arroyo local pero desconocen dónde está el Tormes de *El Lazarillo* (o el Don de Sholojov). Ni las comunidades autónomas reclamaron las transferencias educativas movidas por la preocupación de mejorar la enseñanza de las matemáticas, ni es casual que algunos nacionalistas llamen al proceso descrito, sin rubor alguno, 'hacer país'.

se produzca una adaptación paralela de nuestro cerebro. Éste ha evolucionado durante un par de millones de años, de los cuales sólo los últimos ocho mil corresponderían a un entorno 'civilizado'. Así pues, durante más del 99'5 % de su desarrollo, nuestro cerebro ha evolucionado en un ambiente que tiene poco o nada que ver con las sociedades de hoy. Por eso, como dijo Lorenz, "nosotros somos el eslabón perdido, tanto tiempo buscado, entre el animal y el hombre auténticamente humano". Pero ese ser verdaderamente humano, para quien finalmente dejaría de ser cierto que "el corazón tiene razones que la razón no conoce", no llegará como resultado de la evolución biológica de los actuales hombres y mujeres —ni queda tiempo para esperarlo— sino por medio del aprendizaje y la educación liberal.

La tarea no es nada fácil; la dificultad, como se ha mencionado, tiene que ver con la estructura del cerebro humano, sustrato biológico de nuestra conducta. Las emociones más básicas tienen su sede en las partes más primitivas del mismo, probablemente porque es necesario poder dar una respuesta rápida —es decir, emocional— a determinados peligros y amenazas. El neurólogo estadounidense Paul D. MacLean (1913-2007) propuso en los años cincuenta una estructura del cerebro humano inspirada por la evolución, el *triune brain* o cerebro 'triuno' (trino y uno), que ha tenido gran influencia, incluso en economía y publicidad. MacLean expuso más tarde sus ideas en el libro *The triune brain in evolution: role in paleocerebral functions*, 1990), cuando ya empezaban a ser patentes algunas deficiencias de su esquema. Según éste, nuestro cerebro es realmente el resultado de la superposición de tres cerebros —cada uno con su especial inteligencia- originados sucesivamente en el curso de la evolución. La parte más antigua y profunda es el 'cerebro de los reptiles' o 'complejo—R', donde residirían los instintos más primitivos como la agresión, la territorialidad, las jerarquías (el 'orden de picoteo'), la rabia, el pánico y las funciones fisiológicas básicas. La capa siguiente, el sistema límbico o cerebro primitivo de los mamíferos, controlaría las emociones 'agradables' o 'desagradables', de placer o de dolor y los sentimientos afectivos que se observan en los mamíferos. Finalmente, el civilizado neocórtex, que rodea a las anteriores (y que representa dos terceras partes del peso total), es la sede del pensamiento abstracto y de los juicios, de las tareas conceptuales, de la creatividad, el habla y la conciencia. Se trata de una adquisición relativamente reciente que no ha eliminado el papel del sistema límbico y del 'cerebro de los reptiles', que se hallan rodeados por el neocórtex. Esta estructura 'trina y una' estaba inspirada en las ideas de Ernst Haeckel, quien sostenía que la 'ontogenia es una recapitulación de la filogenia', es decir, que el desarrollo embrionario de un animal tiende a reproducir la historia evolutiva de la especie (aunque se ha reprochado a Haeckel que 'adaptara' algo sus dibujos sobre el desarrollo embrionario). MacLean observó que el desarrollo intrauterino del hombre recorre estadios no muy distintos a los peces, reptiles y mamíferos antes de

adquirir trazos claramente humanos. Según el *triune brain*, que Carl Sagan popularizó en su premio Pulitzer *The dragons of Eden* (1977), por nuestro sistema límbico circularían pensamientos como los que tendría el cerebro de un mamífero como el puma, y nuestro complejo-R produciría reacciones parecidas a las propias de un dinosaurio.

El paradigma del cerebro 'triuno' ha perdido buena parte del favor que tuvo en su día. Aunque es cierto que nuestro cerebro *recapitula* su historia evolutiva, hoy se sabe que hay mucha relación entre los supuestos tres 'cerebros', pues las fuerzas evolutivas no determinan una simple superposición de capas, sino que modifican también las que encuentran debajo. En consecuencia, éstas no permanecen inalteradas: la amígdala y el neocórtex, por ejemplo, también han evolucionado conjuntamente. Las distintas partes del cerebro tienen mucha más plasticidad y están mucho más interconectadas[34] de lo que suponía el modelo de MacLean. No hay duda de que el cerebro ha evolucionado con cada especie: las reacciones de un león y una víbora —o de un elefante y un bichón maltés— son diferentes. Pero, aunque dentro de una especie el comportamiento también pueda serlo, los individuos de una *misma* especie presentan *patrones* de conducta y emocionales *básicos* que les son *comunes* por estar anclados en el cerebro de esa especie. En nuestro caso, esos patrones son los que nos hacen a todos seres humanos por igual y no otra cosa. Por otra parte, aunque nuestro neocórtex puede —y debería— modular las capas reptiliana y límbica, éstas siguen presentes en los humanos actuales bajo la capa externa de su cerebro y pueden tener más influencia sobre el neocórtex que éste sobre ellas. Ése, y no otro, es el origen biológico del conocido aforismo de Pascal antes citado, según el cual *"le coeur a ses raisons que la raison ne connaît pas"*; por eso hay que conseguir que el neocórtex domine a la amígdala, es decir, el pensamiento a la pasión. No se trata de suprimir nuestras emociones —algo imposible y ni siquiera conveniente— sino de controlarlas aprovechando todas las capacidades del neocórtex. Pues, aunque éste sea el responsable final de que, en palabras de Sagan, seamos "material estelar capaz de especular sobre las propias estrellas" o "material cósmico que ha evolucionado hasta tener conciencia de sí mismo", y sea lo que nos hace verdaderamente humanos, seguimos teniendo por debajo —y algo más que en un puro sentido metafórico— el 'cerebro de los reptiles'. Como ya dijo el propio Darwin al final de *The Expression of Emotions in Man and Animals* (1872), "el hombre lleva todavía en su estructura corporal el sello indeleble de su bajo origen".

La especie humana se enfrenta hoy a un reto gigantesco al que habrá de dar solución en una o dos generaciones: la población sobre la Tierra ronda los 6800 millones de perso-

[34]El cerebro humano tiene unas 10^{11} (cien mil millones) neuronas y la increíble cifra de cerca de 10^{15} (mil billones [españoles]) de conexiones o enlaces (sinapsis) entre ellas. Cada neurona tiene entre mil y diez mil conexiones con otras neuronas; es evidente, por tanto, que una misma neurona puede formar parte de múltiples circuitos funcionalmente diferentes. La conectividad sináptica no sólo es longitudinal —entre los distintos niveles de MacLean— sino también transversal.

nas (era menos de la cuarta parte en 1900). Estamos tan acostumbrados, sobre todo en Occidente, a contemplar la historia desde el fin de la segunda guerra mundial como un 'progreso' constante, que no advertimos que una 'sexta extinción' de especies —que seguiría a las cinco grandes extinciones de la historia de la vida— se cierne sobre el planeta. Las necesidades de una población tan desmesurada —que alcanzará los 9000 millones en sólo treinta años— son tales que ya no es posible ignorar las limitaciones de los recursos existentes, el desastroso impacto de la actividad del hombre sobre el planeta ni, incluso, la finitud de la propia Tierra. Por tanto, si no se produce un cambio en el modelo de desarrollo, las sociedades humanas tal como las conocemos hoy podrían, literalmente, 'morir de éxito', arrastrando en su caída a un elevado porcentaje de otras especies y ecosistemas. En la tercera gran extinción (al final del Pérmico, hace 250 Ma), se estima que desapareció el 95 % de las especies. La sexta, de origen humano, no sería quizá tan devastadora para la vida —al menos para insectos como los escarabajos por los que, dado su número y según Haldane, Dios tenía una especial debilidad— pero sí terrible para nuestra especie. Son muchas las voces, desde científicos como el antropólogo Richard Leakey a grandes divulgadores y buenos conocedores de todos los rincones de la Tierra como el premio Príncipe de Asturias David Attenborough, que se han alzado ante el problema. Y desde hace tiempo: yo mismo tuve la oportunidad de oír hace más de veinte años de Jacques-Yves Cousteau (1910-97), otro gran viajero que ya constataba entonces el deterioro de los océanos, que el mayor problema del planeta era la superpoblación. ¿Serán capaces los gobiernos de plantear las reformas necesarias y de convencer a sus ciudadanos para que las acepten? Conocer y plantear un problema no implica, desgraciadamente, que tenga solución cómoda o fácilmente aceptable, y los gobernantes suelen pensar en las próximas elecciones, no en las futuras generaciones. Y saben instintivamente —quizá por eso se llama *animales* políticos a quienes llegan con facilidad al electorado— que es más rentable apelar al corazón que a la cabeza. Nuestros instintos ancestrales no nos han preparado para la actual encrucijada; sólo la educación podría indicar el camino. Pero ésta no es fácil y, dado el natural y biológico egoísmo de los seres humanos —tan grande, al menos, como su capacidad de cooperación— no es obvio que encontremos la salida a tiempo. Por eso es tan importante la educación: su coste es despreciable frente al de la ignorancia.

Conócete a ti mismo, ordenaba a los mortales la inscripción del templo de Apolo en Delfos. Sin olvidar el peso de la cultura y de la historia, es preciso aceptar que *la única forma de superar la tiranía de nuestra naturaleza es reconocerla*: todo ser humano que se precie debería ser consciente de sus propias debilidades y limitaciones. Y es mejor afrontar los retos de nuestro actual e inestable entorno sabiendo quiénes somos y de dónde venimos que ignorándolo. Por otra parte, para poder cambiar algunos aspectos de nuestro mundo, es preciso primero comprenderlo, en lo que las ideas cuyo origen es el *Origen*

juegan un papel esencial. Nuestra especie no puede desconocer su historia ni las leyes de la naturaleza, y es tan utópico como insensato proceder como si estuviera al margen de ellas. Por ello, hoy no puede haber ninguna visión global de las sociedades modernas, ni cabe *Weltanschauung* alguna que sirva de punto de partida para tratar de resolver algunos de sus problemas, al margen de lo que nos enseña la teoría de la evolución y sus consecuencias. Pues, parafraseando a Dobzhanski y extendiendo su afirmación a los seres humanos, si es que él no los incluía ya, *hoy no puede entenderse el mundo de los seres vivos, hombres y mujeres incluidos, al margen de la evolución.* Evolución que, por tanto, es aún más relevante hoy que cuando Darwin la estableció hace ya ciento cincuenta años.

Agradecimientos

Estoy en deuda con un buen número de amigos y colegas, demasiados para enumerar aquí, por discusiones y correspondencia sobre asuntos relacionados con este ensayo, así como por comentarios sobre algunas partes del mismo. De igual forma, me gustaría agradecer a una quincena de universidades e instituciones culturales, y muy en especial a la *Real Academia de Ciencias de Zaragoza*, las invitaciones recibidas para hablar sobre distintas cuestiones evolutivas a lo largo de este año oficioso, que no oficial, de Darwin. Ello me ha decidido, finalmente, a poner mi *Weltanschauung* evolutiva en negro sobre blanco *for whatever it's worth.*

Rev. Real Academia de Ciencias. Zaragoza. **64:** 107–120, (2009).

Generalized Hermite Fractal Interpolation

A. K. B. Chand[1] and M. A. Navascués [2]

[1] Dept. of Mathematics, Indian Institute of Technology Madras

Chennai 600036, India.

[2] Depto. de Matemática Aplicada, CPS, Universidad de Zaragoza

C/ María de Luna 3, Zaragoza 50018, Spain.

Abstract

The classical methods of real data interpolation can be generalized with fractal interpolation. This paper extends the classical Hermite interpolation by means of a class of fractal interpolants. This problem prescribes at each support abscissa not only the value of a function but also its derivatives up to any finite order. Some error bounds of Hermite fractal interpolation function with respect to the data generating function are derived.

Keywords: Fractals, Iterated Function Systems, Fractal Interpolation Functions, Hermite Interpolation

MSC 2000 Classifications: 28A80, 41A15, 65D05, 65D07, 65D10

1 Introduction

Interpolation plays major roles in classical Numerical Analysis. The classical methods of numerical quadrature, numerical integration of ordinary differential equations, numerical differentiation can be studied by means of interpolation functions. We focus attention on a special class of continuous functions, called as fractal interpolation functions (FIFs) constructed by means of iterated function system (IFS). FIFs constitute an advance in the techniques of approximation, since all the classical interpolants can be generalized by means of fractal interpolants [9, 10].

Barnsley [1,2] first developed the theory and applications of FIFs for the approximation of naturally occurring phenomena showing some sort of self-similarity under magnification. Barnsley and Harrington [3] introduced an algebraic method for the construction of a restricted class of C^r-FIF f that interpolates the prescribed data by providing values of $f^{(k)}$, $k = 1, 2, \ldots, r$, at the initial end point of the given interval. However, in their method

of construction, specifying boundary conditions similar to those for classical splines was found to be quite difficult to handle. Spline FIFs with general boundary conditions are proved recently (see for instance [5, 11]).

Hermite's interpolation formula [8] provided an expression for a polynomial which passes through given points with given slopes. The interpolation problem is called Hermite if it compromises only interpolation of consecutive derivatives, commencing with the value of the function itself at all the given mesh point and it is a particular case of the Hermite-Birkhoff interpolation problem [4]. Spitzbart [14] deduced the explicit Hermite polynomial formula so as to include the values of derivatives up to specified and arbitrary orders at the mesh points. The generalized Hermite interpolation plays an important role in radial basis functions [7] and computer graphics [13]. Navascués and Sebastián [11] generalized Hermite functions by fractal interpolation where the problem is prescribed with values of a function and its p derivatives at mesh points. Our approach is more general in the sense that the generalized Hermite FIF matches with the values of derivatives up to specified, arbitrary orders which depend on the points of the partition.

In Section 2, we discuss the basics of FIF. In Section 3, the generalized Hermite FIF is constructed by using classical Hermite interpolation and upper bounds for the error of the generalized Hermite FIF with the original function generating the data are deduced. The effect of the scaling factor is shown in Section 4 with a suitable example.

2 Fractal Interpolation Functions

Suppose $\{(t_n, x_n) \in [t_0, t_N] \times \mathbb{R} : n = 0, 1, 2, \ldots, N\}$ is a given set of interpolation data, where $-\infty < t_0 < t_1 < \cdots < t_N < \infty$. Let us consider $F = I \times \mathbb{R}$. Let $I = [t_0, t_N]$, $I_n = [t_{n-1}, t_n]$, and $L_n : I \longrightarrow I_n$; $n = 1, 2, \ldots, N$ be contractive homeomorphisms such that

$$L_n(t_0) = t_{n-1}, \quad L_n(t_N) = t_n. \tag{1}$$

Let $F_n : F \to \mathbb{R}$ be continuous functions such that

$$\left.\begin{aligned} &F_n(t_0, x_0) = x_{n-1},\ F_n(t_N, x_N) = x_n, \\ &|F_n(t, x) - F_n(t, x^*)| \leq |\alpha_n||x - x^*|, \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

where $t \in I$, $x, x^* \in \mathbb{R}$, and $-1 < \alpha_n < 1$; $n = 1, 2, \ldots, N$. Define, $\omega_n(t, x) = (L_n(t), F_n(t, x))$ for all $n = 1, 2, \ldots, N$. The definition of a FIF originates from the following proposition:

Proposition 2.1. *[2] The above IFS $\{I \times \mathbb{R}; \omega_n, n = 1, 2, \ldots, N\}$ has a unique attractor G. G is the graph of a continuous function $f : I \to \mathbb{R}$ which satisfies $f(t_n) = x_n$ for $n = 0, 1, 2, \ldots, N$.*

The previous function f in Proposition 2.1 is called a fractal interpolation function (FIF) corresponding to the IFS $\{I \times \mathbb{R}; \omega_n, n = 1, 2, \ldots, N\}$. Let $\mathcal{G} = \{g : I \to \mathbb{R} \mid g \text{ is continuous}, g(t_0) = x_0 \text{ and } g(t_N) = x_N\}$. Define a metric on $\mathcal{G}$ by

$$\rho(g, h) = \|g - h\|_\infty = \max\{|g(t) - h(t)| : t \in I\} \ \forall g, h \in \mathcal{G}.$$

Then, $(\mathcal{G}, \rho)$ is a complete metric space. Define the Read-Bajraktarević operator T on $(\mathcal{G}, \rho)$ such that

$$Tg(t) = F_n(L_n^{-1}(t), g(L_n^{-1}(t))), \ t \in I_n, \ \ n = 1, 2, \ldots, N. \tag{3}$$

Using Eqs. (1)-(2), it can be verified that Tg is continuous on the interval $[t_{n-1}, t_n]$ for $n = 1, 2, \ldots, N$ and at each of the points $t_1, t_2, \ldots, t_{N-1}$. T is a contraction mapping on the metric space $(\mathcal{G}, \rho)$ i.e.

$$\|Tf - Tg\|_\infty \leq |\alpha|_\infty \|f - g\|_\infty, \tag{4}$$

where $|\alpha|_\infty = \max\{|\alpha_n| : n = 1, 2, \ldots, N\}$. Since $|\alpha|_\infty < 1$, T possesses a unique fixed point f (say) on $\mathcal{G}$. Hence, it follows from Eq. (3) that the FIF satisfies the following functional relation

$$f(L_n(t)) = F_n(t, f(t)), \ t \in I, \ \ n = 1, 2, \ldots, N. \tag{5}$$

The most widely studied FIFs so far are defined by the IFS

$$\left.\begin{aligned} L_n(t) &= a_n t + b_n, \\ F_n(t, x) &= \alpha_n x + q_n(t), \end{aligned}\right\} n = 1, 2, \ldots, N, \tag{6}$$

where α_n is called a vertical scaling factor of the transformation ω_n and $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_N)$ is the scale vector of IFS.

To construct an α-fractal function h^α for a given continuous function h through the IFS (6), we chose $q_n(t) = h \circ L_n(t) - \alpha_n b(t)$, where b is a real continuous function such that $b \neq h, b(t_0) = x_0, \ b(t_N) = x_N$ and h satisfies $h(t_i) = x_i, i = 0, 1, 2, \ldots, N$ [9]. An upper bound of the difference between a continuous function h and its α-fractal function h^α is given in the following proposition.

Proposition 2.2. *[12] The uniform distance between the α-fractal function h^α and h is given by*

$$\|h^\alpha - h\|_\infty \leq \frac{|\alpha|_\infty}{1 - |\alpha|_\infty} \|h - b\|_\infty, \tag{7}$$

where $|\alpha|_\infty = \max\{|\alpha_n| : n = 1, 2, \ldots, N\}$.

Remark 2.1. *For the particular case of $\alpha = 0$, the fractal function h^α agrees with the given function h.*

The existence of a differentiable or spline FIF is guaranteed by the following proposition:

Proposition 2.3. *[3] Let $\{(t_n, x_n)|n = 0, 1, 2, \ldots, N\}$ be the interpolation data with $t_0 < t_1 < t_2 < \cdots < t_N$. Let $L_n(t) = a_n t + b_n$ that satisfies Eq. (1) and $F_n(t, x) = \alpha_n x + q_n(t)$ for $n = 1, 2, \ldots, N$. Suppose for some integer $r > 0$, $|\alpha_n| < a_n^r$, and $q_n \in C^r[t_0, t_N]; n = 1, 2, \ldots, N$. Let*

$$F_{n,k}(t, x) = \frac{\alpha_n x + q_n^{(k)}(t)}{a_n^k},\ x_{0,k} = \frac{q_1^{(k)}(t_0)}{a_1^k - \alpha_1},\ x_{N,k} = \frac{q_N^{(k)}(t_N)}{a_N^k - \alpha_N},\ k = 1, 2, \ldots, r. \tag{8}$$

If $F_{n-1,k}(t_N, x_{N,k}) = F_{n,k}(t_0, x_{0,k})$ for $n = 2, 3, \ldots, N$ and $k = 1, 2, \ldots, r$, then $\{(L_n(t), F_n(t, x))\}_{n=1}^N$ determines a FIF $f \in C^r[t_0, t_N]$ and $f^{(k)}$, $k = 1, 2, \ldots, r$, is the FIF determined by $\{(L_n(t), F_{n,k}(t, x))\}_{n=1}^N$.

Based on Proposition 2.3, we have constructed generalized Lagrange FIF in the construction of generalized Hermite FIF.

3 Generalized Hermite FIF

We construct generalized Hermite fractal interpolation functions in Section 3.1 and obtain the upper bounds of the error between the Hermite FIF and the original function in Section 3.2.

3.1 Construction of generalized Hermite FIF

Walsh [16] proved the following uniqueness theorem in the complex plane.

Proposition 3.1. *Let the distinct points $z_0, z_1, \ldots, z_N \in \mathbb{C}$ and values $w_n^{(0)}, w_n^{(1)}, \ldots, w_n^{(\eta_n - 1)} \in \mathbb{C}$, $n = 0, 1, \ldots, N$ be given. Then there exists a unique polynomial $p(z)$ of degree*

$$r = -1 + \sum_{n=0}^{N} \eta_n \tag{1}$$

which satisfies the conditions

$$p^{(\nu)}(z_n) = w_n^{(\nu)}, \quad \nu = 0, 1, \ldots, \eta_n - 1, n = 0, 1, \ldots, N.$$

The above proposition was generalized by Spitzbart [14] in the case of real functions giving an explicit expression. With the modern notations, we have chosen the following construction for the generalized Hermite interpolation [15].

Let us consider the real numbers $t_n, x_n^{(k)};\ k = 0, 1, \ldots, \eta_n - 1,\ n = 0, 1, \ldots, N$ such that $t_0 < t_1 < \cdots < t_N$. Then there exists a unique polynomial $H(t)$ whose degree does not exceed r, where r satisfies Eq. (1) and the interpolation conditions:

$$H^{(\nu)}(t_n) = x_n^{(\nu)}, \quad \nu = 0, 1, \ldots, \eta_n - 1, n = 0, 1, \ldots, N. \tag{2}$$

The above classical generalized Hermite interpolation $H(t)$ is given by [15]

$$H(t) = \sum_{n=0}^{N} \sum_{k=0}^{\eta_n - 1} x_n^{(k)} H_{n,k}(t). \tag{3}$$

The polynomials $H_{n,k} \in \Pi_r$ are generalized Lagrange polynomials, where Π_r is the set of all real polynomials whose degree does not exceed r. To define $H_{n,k}$,we have the auxiliary polynomials

$$l_{nk}(t) = \frac{(t - t_n)^k}{k!} \prod_{j=0, j \neq n}^{N} \left(\frac{t - t_j}{t_n - t_j} \right)^{\eta_j}, \quad 0 \leq n \leq N, \quad 0 \leq k < \eta_n, \tag{4}$$

put $H_{n,\eta_n - 1} = l_{n,\eta_n - 1}, \quad n = 0, 1, \ldots, N$, and recursively $k = \eta_n - 2, \eta_n - 3, \ldots, 0$,

$$H_{n,k}(t) = l_{nk}(t) - \sum_{s=k+1}^{\eta_n - 1} l_{nk}^{(s)}(t_n) H_{n,s}(t). \tag{5}$$

Now, we wish to construct a class of fractal functions such that each member of this class will satisfy Eq. (2). For a special case of parameters, we will obtain the classical Hermite polynomial. This fact may be useful whenever some additional condition is imposed to interpolation, for instance the solution of an optimization problem. We need the following result for the construction of a generalized Hermite FIF.

Theorem 3.1. *Let a finite set of equidistant data:* $t_0 < t_1 < \cdots < t_N$ *and* $\{x_n^{(k)};\ k = 0, 1, \ldots, \eta_n - 1,\ n = 0, 1, \ldots, N\}$ *be given. Let the fixed vertical scaling factor* $\alpha_m, m = 1, 2, \ldots, N$ *to be chosen in the following way:*

$$|\alpha_m| < \frac{1}{N^p}, \quad p = \max\{\eta_n; n = 0, 1, \ldots, N\} - 1. \tag{6}$$

Then, for a fixed n *and any* $k = 0, 1, \ldots, \eta_n - 1$, *there exists a fractal function* H_{nk}^{α} *such that*

$$(H_{nk}^{\alpha})^{(\nu)}(t_m) = (H_{nk})^{(\nu)}(t_m),\ m = 0, 1, \ldots, N;\ \nu = 0, 1, \ldots, p. \tag{7}$$

Proof. For the given equidistant data, we define

$$a_m = \frac{t_m - t_{m-1}}{t_N - t_0} = \frac{1}{N},\ m = 1, 2, \ldots, N.$$

We will define a suitable FIF $H_{nk}^{\alpha}(t)$ satisfying the conditions of Proposition 2.3. This FIF will agree at the nodes t_n (up to order p, where $p \geq \eta_n - 1$) with $H_{nk}(t)$. Consider the IFS $\{(L_m, F_m^{nk});\ m = 1, 2, \ldots, N\}$, where $L_m(t) = \frac{t}{N} + b_m$ satisfying Eq. (1) and $F_m^{nk}(t, x) = \alpha_m x + q_m^{nk}(t)$ such that

$$q_m^{nk}(t) = H_{nk} \circ L_m(t) - \alpha_m b_{nk}(t). \tag{8}$$

We will choose $b_{nk}(t)$ so that Eq. (7) is true and $b_{nk} \in C^p(I)$. From Eq. (8),

$$x_{N,\nu}^{nk} = \frac{(q_N^{nk})^{(\nu)}(t_N)}{a_N^\nu - \alpha_N} = \frac{{H_{nk}}^{(\nu)}(t_N) - N^\nu \alpha_N b_{nk}^{(\nu)}(t_N)}{1 - N^\nu \alpha_N}$$

and

$$x_{0,\nu}^{nk} = \frac{(q_1^{nk})^{(\nu)}(t_0)}{a_1^\nu - \alpha_1} = \frac{{H_{nk}}^{(\nu)}(t_0) - N^\nu \alpha_1 b_{nk}^{(\nu)}(t_0)}{1 - N^\nu \alpha_1}.$$

Using these end points in the join-up conditions $F_{m-1,\nu}^{n,k}(t_N, x_{N,\nu}^{nk}) = F_{m,\nu}^{n,k}(t_0, x_{0,\nu}^{nk})$ of Proposition 2.3, we have

$$\begin{aligned}
&\alpha_{m-1}\Big[\frac{{H_{nk}}^{(\nu)}(t_N) - N^\nu \alpha_N b_{nk}^{(\nu)}(t_N)}{1 - N^\nu \alpha_N} - b_{nk}^{(\nu)}(t_N)\Big] \\
&\quad = \alpha_m\Big[\frac{{H_{nk}}^{(\nu)}(t_0) - N^\nu \alpha_1 b_{nk}^{(\nu)}(t_0)}{1 - N^\nu \alpha_1} - b_{nk}^{(\nu)}(t_0)\Big],\ m = 1, 2, \ldots, N.
\end{aligned}$$

If all these vertical scaling factors are same i.e. $\alpha_m = \alpha^*, m = 1, 2, \ldots, N$, the above condition gives

$${H_{nk}}^{(\nu)}(t_N) - b_{nk}^{(\nu)}(t_N) = {H_{nk}}^{(\nu)}(t_0) - b_{nk}^{(\nu)}(t_0). \tag{9}$$

The Eq. (9) is true if

$$\left.\begin{aligned} H_{nk}^{(\nu)}(t_N) &= b_{nk}^{(\nu)}(t_N), \\ H_{nk}^{(\nu)}(t_0) &= b_{nk}^{(\nu)}(t_0), \end{aligned}\right\} \quad \nu = 0, 1, \ldots, p, \tag{10}$$

and Eq. (10) is true if we consider Hermite polynomial $b_{nk}(t)$ with respect to nodes t_0 and t_N with contact order p. Hence, $b_{nk}(t)$ is given by

$$b_{nk}(t) = \sum_{\nu=0}^{p} H_{nk}^{(\nu)}(t_0)\tilde{H}_{0,\nu}(t) + \sum_{\nu=0}^{p} H_{nk}^{(\nu)}(t_N)\tilde{H}_{N,\nu}(t), \tag{11}$$

where $\tilde{H}_{0,\nu}$ and $\tilde{H}_{N,\nu}$ are generalized Lagrange polynomials defined as follows. Starting with the auxiliary polynomials

$$\tilde{l}_{0,\nu}(t) = \frac{(t - t_0)\nu}{\nu!}\Big(\frac{t - t_N}{t_0 - t_N}\Big)^{p+1},\ \tilde{l}_{N,\nu}(t) = \frac{(t - t_N)\nu}{\nu!}\Big(\frac{t - t_0}{t_N - t_0}\Big)^{p+1};\ 0 \le \nu \le p,$$

put $\tilde{H}_{i,p}(t) = \tilde{l}_{i,p}(t)$ for $i = 0, N$, and recursively for $\nu = p-1, p-2, \ldots, 0$ with $i = 0, N$, we have

$$\tilde{H}_{i,\nu}(t) = \tilde{l}_{i,\nu}(t) - \sum_{s=\nu+1}^{p} \tilde{l}_{i,\nu}^{(s)}(t_i)\tilde{H}_{i,s}(t). \tag{12}$$

Suppose $H_{nk}^{\alpha}(t)$ be the fractal function with the choice of $b_{nk}(t)$ given by Eq. (11). The IFS associated with $(H_{nk}^{\alpha})^\nu(t)$ is given by (cf. Proposition 2.3)

$$\begin{cases} L_m(t) = \dfrac{1}{N}t + b_m, \\ F_{m\nu}^{nk}(t, x) = N^\nu \alpha^* x + N^\nu (q_m^{nk})^{(\nu)}(t) = N^\nu \alpha^* x + H_{nk}^{(\nu)}(L_m(t)) - N^\nu \alpha^* {b_{nk}}^{(\nu)}(t) \end{cases} \tag{13}$$

Now, according to Eq. (8) and (10)

$$\begin{aligned} {H_{nk}^{\alpha}}^{(\nu)}(t_0) = x_{0\nu}^{nk} &= \frac{(q_1^{nk})^{(\nu)}(t_0)}{a_1^{\nu} - \alpha^*} = \frac{1}{a_1^{\nu} - \alpha^*}\Big(\frac{H_{nk}^{(\nu)}(L_1(t_0))}{N^{\nu}} - \alpha^* {b_{nk}}^{(\nu)}(t_0)\Big) \\ &= \frac{1}{1-\alpha^* N^{\nu}}\Big(H_{nk}^{(\nu)}(t_0) - \alpha^* N^{\nu} {b_{nk}}^{(\nu)}(t_0)\Big) = H_{nk}^{(\nu)}(t_0). \end{aligned}$$

Similarly, we have ${H_{nk}^{\alpha}}^{(\nu)}(t_N) = H_{nk}^{(\nu)}(t_N)$. For intermediate points $m = 1, 2, \ldots, N-1$,

$$\begin{aligned} {H_{nk}^{\alpha}}^{(\nu)}(t_m) &= F_{m\nu}^{nk}(L_m^{-1}(t_m), {H_{nk}^{\alpha}}^{(\nu)} \circ L_m^{-1}(t_m)) \\ &= N^{\nu}\alpha^* {H_{nk}^{\alpha}}^{(\nu)} \circ L_m^{-1}(t_m) + H_{nk}^{(\nu)}(t_m) - N^{\nu}\alpha^* {b_{nk}}^{(\nu)} \circ L_m^{-1}(t_m) \\ &= N^{\nu}\alpha^* {H_{nk}^{\alpha}}^{(\nu)}(t_N) + H_{nk}^{(\nu)}(t_m) - N^{\nu}\alpha^* {b_{nk}}^{(\nu)}(t_N) = H_{nk}^{(\nu)}(t_m). \end{aligned}$$

Hence, H_{nk}^{α} is the required generalized Lagrange fractal function. □

Definition 3.1. *With these Lagrange fractal functions $H_{n,k}^{\alpha}$ defined in Theorem 3.1, the generalized Hermite FIF H^{α} is given by*

$$H^{\alpha}(t) = \sum_{n=0}^{N}\sum_{k=0}^{\eta_n - 1} x_n^{(k)} H_{n,k}^{\alpha}(t). \tag{14}$$

Remark 3.1. *If $\alpha = 0$, $H_{nk}^{\alpha} = H_{nk}$ and $H^{\alpha} = H$ (cf. Remark 2.1) and we obtain the classical Hermite polynomial case.*

For a fixed partition Δ, a fixed scaling vector α and fixed set of $\{\eta_0, \eta_1, \ldots, \eta_N\}$, We can define an operator $\mathcal{H}$ on $C^p(I)$ such that $\mathcal{H}(g)$ is the generalized Hermite FIF (cf. Definition 3.1) for a function $g \in C^p(I)$.

Theorem 3.2. *$\mathcal{H}$ is a linear and bounded operator of $C^p(I)$.*

Proof. For given $g, h \in C^p(I)$ and real scalar λ, Definition 3.1, we have

$$\begin{aligned} \mathcal{H}(g+h) &= \sum_{n=0}^{N}\sum_{k=0}^{\eta_n - 1} (g+h)^{(k)}(t_n) H_{n,k}^{\alpha}(t) = \mathcal{H}(g) + \mathcal{H}(h), \\ \mathcal{H}(\lambda g) &= \sum_{n=0}^{N}\sum_{k=0}^{\eta_n - 1} (\lambda g)^{(k)}(t_n) H_{n,k}^{\alpha}(t) = \lambda \mathcal{H}(g). \end{aligned}$$

We consider $C^p(I)$ endowed with the norm $\|g\|_{C^p(I)} = \sup\limits_{0 \le k \le p} \|g^{(k)}\|_{\infty}$. Now,

$$\begin{aligned} \|(\mathcal{H}(g))^{(\nu)}\|_{\infty} &= \sup_{t \in I} |\sum_{n=0}^{N}\sum_{k=0}^{\eta_n - 1} g^{(k)}(t_n)(H_{n,k}^{\alpha})^{(\nu)}(t)| \\ &\le \|g\|_{C^p(I)} \sum_{n=0}^{N}\sum_{k=0}^{\eta_n - 1} \|(H_{n,k}^{\alpha})^{(\nu)}\|_{\infty} \end{aligned} \tag{15}$$

From the IFS (13) of $(H^{\alpha}_{n,k})^{(\nu)}$, the vertical scaling factor is $N^{\nu}\alpha^*$. Using Proposition 2.2, for $\nu = 0, 1, \ldots, p$,

$$\begin{aligned}\|(H^{\alpha}_{n,k})^{(\nu)} - (H_{n,k})^{(\nu)}\|_{\infty} &\leq \frac{N^{\nu}|\alpha^*|}{1 - N^{\nu}|\alpha^*|}\|(H_{n,k})^{(\nu)} - (b_{n,k})^{(\nu)}\|_{\infty} \\ &\leq \frac{N^{p}|\alpha^*|}{1 - N^{p}|\alpha^*|}\|H_{n,k} - b_{n,k}\|_{C^p(I)}\end{aligned}$$

this gives

$$\|(H^{\alpha}_{n,k})^{(\nu)}\|_{\infty} \leq \frac{N^{p}|\alpha^*|}{1 - N^{p}|\alpha^*|}\|H_{n,k} - b_{n,k}\|_{C^p(I)} + \|H_{n,k}\|_{C^p(I)} \tag{16}$$

Combining Eq. (15) and Eq. (16), an upper bound of $\mathcal{H}$ is given by

$$\|\mathcal{H}\| \leq \frac{N^{p}|\alpha^*|}{1 - N^{p}|\alpha^*|}\sum_{n=0}^{N}\sum_{k=0}^{\eta_n - 1}\|H_{n,k} - b_{n,k}\|_{C^p(I)} + \sum_{n=0}^{N}\sum_{k=0}^{\eta_n - 1}\|H_{n,k}\|_{C^p(I)}$$

□

3.2 Upper bounds of the error

We need the following result from classical numerical analysis [15].

Proposition 3.2. *Consider the real numbers $t_n, g^{(k)}(t_n)$, $k = 0, 1, \ldots, \eta_n - 1$, $n = 0, 1, \ldots, N$ such that $t_0 < t_1 < \cdots < t_N$ where g is r-times differentiable with $r+1 = \sum_{n=0}^{N}\eta_n$. If the polynomial $H(t)$ is of degree at most r and satisfies the following interpolation conditions*

$$H^{(k)}(t_n) = g^{(k)}(t_n), \quad k = 0, 1, \ldots, \eta_n - 1, n = 0, 1, \ldots, N,$$

then to every $\bar{t} \in [t_0, t_N]$, there exists $\xi \in [t_0, t_N]$ such that

$$g(\bar{t}) - H(\bar{t}) = \frac{\omega(\bar{t})g^{(r+1)}(\xi)}{(r+1)!}, \tag{17}$$

where $\omega(t) = (t - t_0)^{\eta_0}(t - t_1)^{\eta_1}\ldots(t - t_N)^{\eta_N}$.

Let H^{α} be the Hermite FIF to the original function f. To compute an upper bound of uniform distance between f and H^{α}, we use Proposition 3.2, Proposition 2.2 and the definitions of H and H^{α}:

$$\begin{aligned}\|f - H^{\alpha}\|_{\infty} &\leq \|f - H\|_{\infty} + \|H - H^{\alpha}\|_{\infty} \\ &\leq \frac{K\|f^{(r+1)}\|_{\infty}}{(r+1)!} + \|H - H^{\alpha}\|_{\infty}, \quad K = \sup_{t\in[t_0,t_N]}|\omega(t)| \\ &\leq \frac{K\|f^{(r+1)}\|_{\infty}}{(r+1)!} + \sum_{n=0}^{N}\sum_{k=0}^{\eta_n - 1}\|f^{(k)}\|_{\infty}\|H_{n,k} - H^{\alpha}_{n,k}\|_{\infty} \\ &\leq \frac{K\|f^{(r+1)}\|_{\infty}}{(r+1)!} + \sum_{n=0}^{N}\sum_{k=0}^{\eta_n - 1}\|f^{(k)}\|_{\infty}\frac{|\alpha^*|}{1 - |\alpha^*|}\|H_{n,k} - b_{n,k}\|_{\infty}\end{aligned} \tag{18}$$

In order to compute $\|H_{n,k} - b_{n,k}\|_{\infty}$, we need the following proposition.

Proposition 3.3. *[6, 15] Let $x(t) \in C^u[t_0, t_N]$ with $u \geq 2s+2$, let Δ be any partition of $[t_0, t_N]$, $\Delta : t_0 < t_1 < \cdots < t_N$, and let $\phi(t)$ be the unique Hermite interpolation of $x(t)$ such that $x^{(\nu)}(t_n) = \phi^{(\nu)}(t_n)$ for all $0 \leq n \leq N$, $0 \leq \nu \leq s$. Then, for all l with $0 \leq l \leq s$*

$$\|x^{(l)} - \phi^{(l)}\|_\infty \leq \frac{\|\Delta\|^{2s+2-l}}{2^{2s+2-2l} s!(2s+2+2l)!} \|x^{(2s+2)}\|_\infty \tag{19}$$

Taking $x(t) = H_{n,k}(t)$ and $\phi(t) = b_{n,k}(t)$ with $l = 0$ and $s = 0$ in Eq. (19), we have

$$\|H_{n,k} - b_{n,k}\|_\infty \leq \frac{|I|^2}{8} \|H_{n,k}^{(2)}\|_\infty, \tag{20}$$

where I is the length of the interval $I = [t_0, t_N]$. Set $L = \max\{\|f^{(k)}\|_\infty : k = 0, 1, \ldots, \eta_n - 1; n = 0, 1, \ldots, N\}$ and $\Theta = \max\{\|H_{n,k}^{(2)}\|_\infty : k = 0, 1, \ldots, \eta_n - 1; n = 0, 1, \ldots, N\}$. From Eq. (18) and Eq. (20), an upper bound of uniform error bound between the original function and generalized Hermite FIF is given by

$$\|f - H^\alpha\|_\infty \leq \frac{K\|f^{(r+1)}\|_\infty}{(r+1)!} + \frac{|I|^2(r+1)}{8} L\Theta. \tag{21}$$

For convergence of H^α and its derivatives towards the original function f, consider the following for $\nu = 0, 1, \ldots, p$.

$$\begin{aligned}
\|H^{(\nu)} - (H^\alpha)^{(\nu)}\|_\infty &\leq \sum_{n=0}^{N} \sum_{k=0}^{\eta_n - 1} \|f^{(k)}\|_\infty \frac{N^\nu |\alpha^*|}{1 - N^\nu |\alpha^*|} \|H_{n,k}^{(\nu)} - b_{n,k}^{(\nu)}\|_\infty \\
&\leq \sum_{n=0}^{N} \sum_{k=0}^{\eta_n - 1} \|f\|_{C^p(I)} \frac{N^p |\alpha^*|}{1 - N^p |\alpha^*|} \|H_{n,k} - b_{n,k}\|_{C^p(I)}
\end{aligned}$$

which gives that

$$\|H - H^\alpha\|_{C^p(I)} \leq \frac{N^p |\alpha^*| \|f\|_{C^p(I)}}{1 - N^p |\alpha^*|} \sum_{n=0}^{N} \sum_{k=0}^{\eta_n - 1} \|H_{n,k} - b_{n,k}\|_{C^p(I)} \tag{22}$$

Hence, we have the following result.

Theorem 3.3. *Let $f(t) \in C^p(I)$ be the original function approximated by a generalized Hermite FIF $H^\alpha(t)$ such that $|\alpha^*| < \frac{1}{N^p}$, where $p = \max\{\eta_n; n = 0, 1, \ldots, N\} - 1$. Then,*

$$\|f - H^\alpha\|_{C^p(I)} \leq \|f - H\|_{C^p(I)} + \frac{N^p |\alpha^*| \|f\|_{C^p(I)}}{1 - N^p |\alpha^*|} \sum_{n=0}^{N} \sum_{k=0}^{\eta_n - 1} \|H_{n,k} - b_{n,k}\|_{C^p(I)}$$

Proof. Using the triangle inequality,

$$\|f - H^\alpha\|_{C^p(I)} \leq \|f - H\|_{C^p(I)} + \|H - H^\alpha\|_{C^p(I)}$$

and Eq. (22), Theorem 3.3 follows. For the first term of the sum, one can apply a classical theorem of Hermite interpolation error. □

4 Examples

Suppose $N = 2$, $\eta_0 = 3, \eta_1 = 4, \eta_2 = 2$ and

$$\begin{aligned}
&t_0 = 0, \quad x_0 = 1, \quad x_0^{(1)} = 4, \quad x_0^{(2)} = 9;\\
&t_1 = 2, \quad x_1 = -1, \quad x_1^{(1)} = -3, \quad x_1^{(2)} = -8, \quad x_1^{(3)} = -5;\\
&t_2 = 4, \quad x_2 = 3, \quad x_2^{(1)} = 7.
\end{aligned}$$

From the given data, we have $a_m = 1/2$ for $m = 1, 2$ and

$$L_1(t) = \frac{t}{2}, \quad L_1(t) = \frac{t}{2} + 2.$$

According to Eq. (6), $\alpha^* < \frac{1}{2^3}$.
For $n = 0$, using Eq. (5) , we have

$$\begin{aligned}
H_{0,0}(t) &= \frac{(1 + \frac{5}{2}t + \frac{59}{16}t^2)(t-2)^4(t-4)^2}{256}, \quad H_{0,2}(t) = \frac{t^2(t-2)^4(t-4)^2}{512},\\
H_{0,1}(t) &= \frac{(2t + 5t^2)(t-2)^4(t-4)^2}{512}.
\end{aligned}$$

Similarly, for $n = 1$, we have

$$\begin{aligned}
H_{1,0}(t) &= \frac{t^3(64 - 64t + 24t^2 - 3t^3)(t-4)^2}{256}, \quad H_{1,2}(t) = \frac{t^3(t-2)^2(4-t)^3}{128},\\
H_{1,1}(t) &= \frac{t^3(20 - 14t + 3t^2)(t-2)(t-4)^2}{128}, \quad H_{1,3}(t) = \frac{t^3(t-2)^3(t-4)^2}{192}
\end{aligned}$$

and for $n = 2$,

$$H_{2,0}(t) = \frac{(48 - 11t)t^3(t-2)^4}{4096}, \quad H_{2,1}(t) = \frac{t^3(t-4)(t-2)^4}{1024}.$$

For the construction of b_{nk}, we need the following Hermite polynomials of order 3 (cf. Eq. (12)).

$$\begin{aligned}
\tilde{H}_{0,0}(t) &= \frac{(1 + t + \frac{5}{8}t^2 + \frac{5}{16}t^3)(t-4)^4}{256}, \quad \tilde{H}_{0,2}(t) = \frac{t^2(1+t)(t-4)^4}{512},\\
\tilde{H}_{0,1}(t) &= \frac{(1 + t + \frac{5}{8}t^2)t(t-4)^4}{256}, \quad \tilde{H}_{0,3}(t) = \frac{t^3(t-4)^4}{1536},\\
\tilde{H}_{2,0}(t) &= \frac{(35 - 21t + \frac{35}{8}t^2 - \frac{5}{16}t^3)t^4}{256}, \quad \tilde{H}_{2,2}(t) = \frac{t^4(t-4)^2(5-t)}{512},\\
\tilde{H}_{2,1}(t) &= \frac{(15 - 6t + \frac{5}{8}t^2)(t-4)t^4}{256}, \quad \tilde{H}_{2,3}(t) = \frac{t^4(t-4)^3}{1536}.
\end{aligned}$$

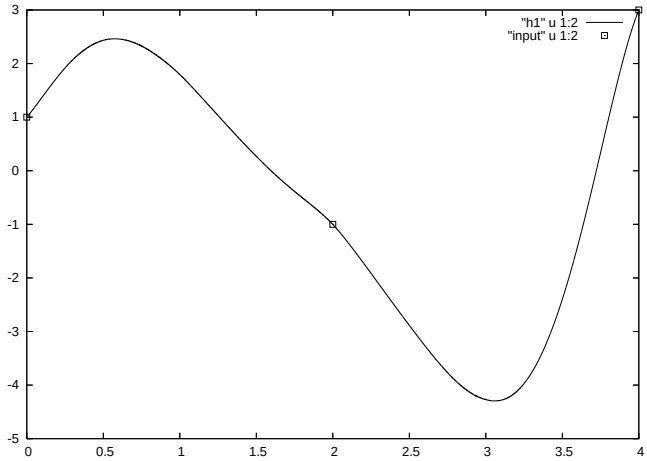

Figure 1.— Hermite FIF with $\alpha^* = 0.1$.

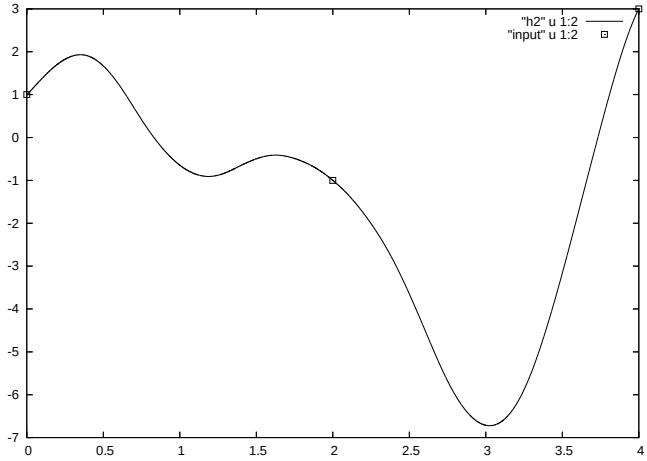

Figure 2.— Hermite FIF with $\alpha^* = -0.1$.

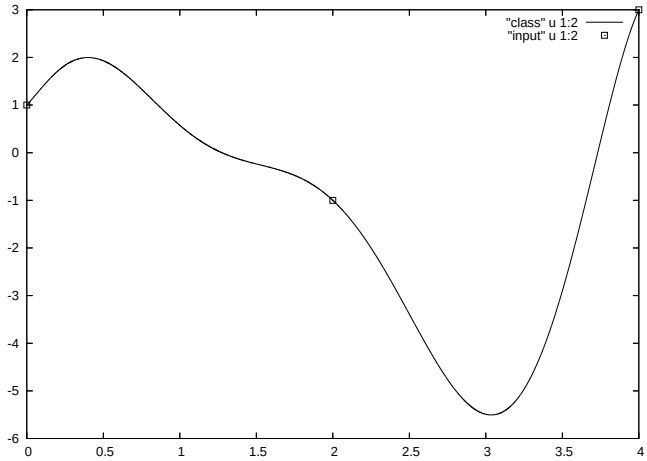

Figure 3.— Classical Hermite Interpolation with $\alpha^* = 0$.

From Eq. (11), the desired b_{nk} are computed as follows.

$$b_{0,0}(t) = \frac{(32+16t+6t^2-132t^3+21t^4+5t^5)(t-4)^2}{512}, \quad b_{0,2}(t) = \frac{(2-4t+t^2)t^2(t-4)^2}{64},$$
$$b_{0,1}(t) = \frac{(16+8t-56t^2+12t^3+t^4)t(t-4)^2}{256},$$
$$b_{1,0}(t) = \frac{(4-t)^3t^3}{16}, \qquad b_{1,1}(t) = \frac{(-10+t^2)(t-4)^2t^3}{32},$$
$$b_{1,2}(t) = \frac{(4-t)^3t^3}{32}, \qquad b_{1,3}(t) = \frac{(-4-2t+t^2)(t-4)^2t^3}{96},$$
$$b_{2,0}(t) = \frac{(96+138t-164t^2+51t^3-5t^4)t^3}{512}, \quad b_{2,1}(t) = \frac{(4+8t-6t^2+t^3)(t-4)t^3}{256}.$$

From Theorem 3.1, the IFS for the generalized Lagrange FIF corresponding to $H^{\alpha}_{n,k}$ is given by

$$\begin{cases} L_m(t) = \dfrac{t}{N} + b_m, \\ F^{nk}_m(t,x) = \alpha_m x + H_{nk} \circ L_m(t) - \alpha_m b_{nk}(t). \end{cases} \tag{1}$$

In view of Eq. (6), we have chosen $\alpha^* = 0.1$ and $\alpha^* = -0.1$ in the construction of the generalized Hermite FIFs. With the above choices for the vertical scaling factors, and the mappings H_{nk} and b_{nk}, the iteration of the resulting IFS code Eq. (1) generates the generalized Lagrange FIFs $H^{\alpha}_{n,k}$. Using these $H^{\alpha}_{n,k}$, we have plotted the generalized Hermite FIFs of Eq. (14) (see Figure 1 and Figure 2). Finally, we have chosen $\alpha^* = 0$. Since $F^{nk}_m(t,x)$ reduces to function of t only in this case, $H^{\alpha}_{n,k}(t) = H_{n,k}(t)$ and consequently $H^{\alpha}(t)$ agrees with the classical Hermite interpolation function $H(t)$ (see Figure 3). With the effective use of scaling factors, our construction of Hermite FIFs offers additional advantage over the classical Hermite interpolation functions. The use of Hermite FIF may be exploited in computer graphics, radial basis functions, and smooth object approximation in scientific problems as one can have infinite number of Hermite FIFs depending on the scaling factors, giving thereby a large flexibility in the choice of Hermite FIFs according to the need of an experiment.

5 Conclusion

In this paper, we generalize the classical Hermite interpolation by a class of fractal interpolants. This problem prescribes at each support mesh points not only the value of a function but also its derivative up to any finite order. The order of derivatives at each node is non-constant and generalizes the case considered in the reference [11]. In the simulation of smooth curves, our construction offers a large flexibility in the choice of a suitable interpolating Hermite fractal curves. This fact may be useful whenever some additional condition is imposed to the interpolation, for instance the solution of an optimization problem. Some upper bounds for the error between the original function f

and the generalized Hermite FIF are deduced and these bounds depend on the scaling vector α.

Acknowledgments

The work was supported by the project No: SB 2005-0199, Spain. The first author is thankful to the Institute of Mathematics and Applications, Bhubaneswar, India for its support after this project.

References

[1] M. F. Barnsley, Fractal functions and interpolation, Constr. Approx., 2, pp. 303-329 (1986).

[2] M. F. Barnsley, Fractals Everywhere, Academic Press, Orlando, Florida 1988.

[3] M. F. Barnsley and A. N. Harrington, The calculus of fractal interpolation functions, J. Approx. Theory, 57, pp. 14-34 (1989).

[4] G. D. Birkhoff, General mean value and remainder theorems with applications to mechanical differentiation and integration, Trans. Amer. Math. Soc., 7, pp. 107-136 (1906).

[5] A. K. B. Chand and G. P. Kapoor, Generalized cubic spline fractal interpolation functions, SIAM J. Num. Anal., 44(2), pp. 655-676 (2006).

[6] P. G. Ciarlet, M. H. Schultz and R. S. Varga, Numerical methods of high-order accuracy for nonlinear boundary value problems. I. One dimensional problem, Numer. Math., 9, pp 394-430 (1967).

[7] G. Fasshauer, Hermite interpolation with radial basis functions on spheres, Advances in Computational Mathematics, 10(1), pp. 81-96 (1999).

[8] C. Hermite, Sur la formule d'interpolation de Lagrange, J. Reine Angew. Math., 84, pp. 70-79 (1878).

[9] M. A. Navascués, Fractal polynomial interpolation, Z. Anal. Anwend, 25(2), pp. 401-418 (2005).

[10] M. A. Navascués and A. K. B. Chand, Fundamental sets of fractal functions, Acta Applicandae Mathematicae, 100, pp. 247-261 (2008).

[11] M. A. Navascués and M. V. Sebastián, Generalization of Hermite functions by fractal interpolation, J. Approx. Theory, 131(1), pp. 19-29 (2004).

[12] M. A. Navascués and M. V. Sebastián, Fitting curves by fractal interpolation: an application to the quantification of cognitive brain processes, Thinking in Patterns: Fractals and Related Phenomena in Nature. M. M. Novak, (ed.), pp. 143-154, World Scientific, 2004.

[13] D. Salomon, Curves and Surfaces for Computer Graphics, Springer Verlag, 2005.

[14] A. Spitzbart, A generalization of Hermite's interpolation formula, Amer. Math. Monthly, 67, pp. 42-46 (1960).

[15] J. Stoer and R. Bulirsch, Introduction to Numerical Analysis, Springer, New York, 1980.

[16] J. L. Walsh, Interpolation and approximation by rational functions in the complex domain, Amer. Math. Society Colloquium Publications, 20, pp. 49-54 (1935).

ACTIVIDADES DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS, QUÍMICAS Y NATURALES DE ZARAGOZA EN EL AÑO 2009

Sesiones:

En el año 2009 la Real Academia de Ciencias de Zaragoza celebró ocho Sesiones. De ellas cinco fueron Ordinarias y tres Extraordinarias, dos con motivo de los Discursos de Ingreso de dos nuevo Académicos Numerarios y una de Entrega de Premios de Investigación.

Las Ordinarias tuvieron lugar los días 5 de febrero, 23 de marzo, 28 de mayo, 30 de septiembre y 17 de diciembre.

La Extraordinarias tuvieron lugar en las fechas que se indican:

- 4/6/2009. Discurso del Académico Numerario Ilmo. Sr. D. Rafael Navarro Linares, con el título *Balance de un siglo de superconductividad y superconductores.* Le respondió en nombre de la Academia el Ilmo. Sr. D. Víctor Orera Clemente.

- 24/11/2009 Discurso del Académico Numerario Ilmo. Sr. D. Enrique Artal Bartolo, con el título *La Monodromía: a vueltas entre la Topología, la Geometría y el Álgebra.* Le respondió en nombre de la Academia la Ilma. Sra. Doña María Teresa Lozano Imízcoz.

- 9/11/20079. Entrega de Premios de Investigación 2008-2009.

Nuevos Académicos Numerarios:

- Ilmo. Sr. D. Rafael Navarro Linares, Académico Numerario (Sección de Físicas) con la Medalla Nº 40.

- Ilmo. Sr. D. Enrique Artal Bartolo, Académico Numerario (Sección de Exactas) con la Medalla Nº 4.

Nuevo Tesorero de la Academia:

- Ilmo. Sr. D. Miguel Pocoví Mieras, elegido en la Sesión de 28 de mayo de 2009, en sustitución de D. Manuel Quintanilla Montón.

Publicaciones de la Academia:

- Los dos Discursos de Ingreso citados en el apartado de Sesiones.
- Volumen 64 de la Revista de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza.
- Volumen 31 de la serie Monografías de la Academia de Ciencias, con el título de *Maths and Water*.
- Volumen 32 de la serie Monografías de la Academia de Ciencias, con el título de *Actas de las XI Jornadas de Mecánica Celeste.*
- Digitalización de todos los números de la Revista de la Academia de Ciencias de Zaragoza. Gracias a una subvención del Departamento de Ciencia, Tecnología y Universidad del Gobierno de Aragón, se ha llevado a cabo la digitalizaci'on de los volḿenes históricos de la Revista. Se puede acceder a través de la página web de la Real Academia (`http://www.unizar.es/acz/`) y de (`http://zaguan.unizar.es/`)

Organización de Congresos y Conferencias:

La Academia ha organizado en 2009, entre otros, los siguientes eventos:

- Actos conmemorativos del centenario del nacimiento del que fue Académico de Zaragoza D. Francisco Grande Covián, con una Sesión científico-social conmemorativa en la Facultad de Ciencias, el día 6 de noviembre, con participación de científicos, amigos y familiares del Dr. Grande Covián.
- Conferencia del Académico de Medicina de Zaragoza D. Miguel Andériz en la Academia de Ciencias de Zaragoza, el 15 de junio, sobre *El discurrir de los médicos en algunos problemas del Cálculo de Probabilidades.*
- Conferencia del Académico Correspondiente D. Adolfo Azcárraga, el 22 de enero, sobre *150 años tras el Origen de las Especies: la teoría de la Evolución y su importancia actual.*
- También se ha colaborado en la organización del Ciclo de Conferencias *Cita con la Ciencia-Espacio Facultad 2008-2009* en la Facultad de Ciencias.

- La Academia ha colaborado con el Depto. de Matemáticas de la Universidad de Zaragoza en la organización de un congreso internacional titulado *Lib60ber: Topology of Algebraic Varieties* celebrado en junio de 2009 en Jaca (Huesca) en honor del 60 aniversario de Anatoly Libgober.

- También colaboró en la organización del *XVIII International Fall Workshop on Geometry and Physics* celebrado en Benasque (Huesca).

- Conferencia del Profesor Mario Bunge, de la Universidad de Montreal, en la Academia de Ciencias de Zaragoza, el 27 de mayo, sobre *Tres enfoques de los problemas científicos.*

- Conferencia del Académico Correspondiente D. Javier Llorca , el 6 de mayo sobre *Ensayos virtuales de Materiales Compuestos.*

- La Academia colabora en la organización del *Taller de Talento Matemático* que, con objeto de promover el descubrimiento de habilidades matemáticas en niños y niñas, tiene lugar anualmente bajo la dirección del Académico D. Alberto Elduque

Dentro de la habitual participación de Académicos en numerosos Congresos nacionales e internacionales, y en conferencias en el ámbito de la difusión de la ciencia, cabe destacar las siguientes actuaciones.

- El Dr. Luis J. Boya fue profesor invitado en el *6th International Symposium on Nuclear and Related Techniques (NURT-09)* celebrado en La Habana, Cuba, del 9 al 12 de febrero de 2009.

- El Dr. José F. Cariñena fue Presidente del Comité Organizador del *XVIII Internacional Fall Workshop on Geometry and Physics* celebrado en Benasque (Huesca).

- El Dr. Cariñena fue conferenciante invitado y miembro del Comité Científico del *XXIV Workshop on Differential Geometry Methods in Theoretical Mechanics* celebrado en Levito-Terme, Italia, y conferenciante invitado en el congreso *Geometry of constraints and control* celebrado en Varsovia. También ha impartido Seminarios en la Universidad de Trento (Italia), en la Universidad de Varsovia y en el Banach Center de esa misma ciudad.

- El Prof. Elipe ha sido del Comité Científico del *IAU Symposium 261.* "RELATIVITY IN FUNDAMENTAL ASTRONOMY: Dynamics, Reference Frames, And Data Analysis." celebrado en Viginia Beach, USA y de las *XII Jornadas de trabajo en mecánica celeste* celebradas en Lalín, Pontevedra. Ha sido conferenciante invitado en el *2009 Congreso de la RSME* celebrado en Oviedo; en la *Cátedra Cervantes de*

las Armas y las Letras en la Academia General Militar y en el congreso *Complejidad 2009 : IV Encuentros sobre Modelización de Sistemas Complejos* en la Universidad Rey Juan Carlos. Con motivo del la celebración del *Año Internacional de la Astronomía* ha impartido numerosas conferencias en varias universidades y centros de Primaria y Secundaria.

Varios Académicos colaboran con cursos propios en la Universidad de la Experiencia que organiza la Universidad de Zaragoza

Premios de investigación 2009

Se convocaron los Premios de Investigación 2008-2009 de la Academia correspondientes a las secciones de Químicas y Naturales . En la primera el Premio fue para la Dra. Dña. Ana María Mainar, del Departamento de Química Física y Química Orgánica de la Universidad de Zaragoza. El segundo para la Dra. Dña. Inmaculada López Alados, del Instituto Pirenaico de Ecología-CSIC de Zaragoza. Las premiadas expusieron sendos trabajos de investigación en la Sesión Extraordinaria de la Academia celebrada el 9 de noviembre en la que recibieron el Premio, con los títulos respectivos de *Termodinámica Química: de los Fundamentos a la Aplicación* e *Inestabilidad en el desarrollo y cambio global en plantas*, que se publican en el volumen 64 de la Revista de la Academia.

Se ha iniciado el proceso para los Premios 2009-2010 en las Secciones de Físicas y Exactas.

Distinciones y Nombramientos a Académicos.

El Académico D. Antonio Elipe fue nombrado Director del nuevo Centro Universitario de Defensa de la Academia General Militar de Zaragoza.

Otros datos.

La Real Academia de Ciencias de Zaragoza ha sido subvencionada en su funcionamiento habitual por el Ministerio de Educación y Ciencia a través del programa de apoyo a las Reales Academias asociadas al Instituto de España, siendo la subvención para 2009 de 12900 euros.

Así mismo recibió una subvención extraordinaria para la digitalización de sus fondos bibliográficos de 5977 euros del Gobierno de Aragón.

Se ha continuado poniendo al día la página web de la Academia, cuya dirección es `http://www.unizar.es/acz/`

Zaragoza, diciembre de 2009

REVISTA DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES DE ZARAGOZA

Abstract

La Revista de la Real Academia de Ciencias publishes original research contributions in the fields of Mathematics, Physics, Chemistry and Natural Sciences. All the manuscripts are peer reviewed in order to assess the quality of the work. On the basis of the referee's report, the Editors will take the decision either to publish the work (directly or with modifications), or to reject the manuscript.

1 Normas generales de publicación

1.1 Envío de los manuscritos.

Para su publicación en esta Revista, los trabajos deberán remitirse a

Académico-Director de Publicaciones
Revista de la Academia de Ciencias
Universidad de Zaragoza
50009 Zaragoza

o bien electrónicamente a la cuenta `elipe@unizar.es`.

La Revista utiliza el sistema de *offset* de edición, empleando el texto electrónico facilitado por los autores, que deberán cuidar al máximo su confección, siguiendo las normas que aquí aparecen.

Los autores emplearán un procesador de texto. Se recomienda el uso de LaTeX, para el que se han diseñado los estilos `academia.sty` y `academia.cls` que pueden obtenerse directamente por internet en `http://www.unizar.es/acz/` o por petición a la cuenta de correo electrónico: `elipe@unizar.es`.

1.2 Dimensiones

El texto de los trabajos, redactados en español, inglés o francés, no deberá exceder de 16 páginas, aunque se recomienda una extensión de 6 a 10 páginas como promedio. El texto de cada página ocupará una caja de 16×25 cm., con espacio y medio entre líneas.

2 Presentación del trabajo.

Los trabajos se presentarán con arreglo al siguiente orden: En la primera página se incluirán los siguientes datos:

a) Título del trabajo: Conciso, pero ilustrativo, con mayúsculas.

b) Autor: Nombre y apellidos del autor o autores, con minúscula.

c) Centro: Centro donde se ha realizado, con su dirección postal.

d) Abstract: En inglés y con una extensión máxima de 200 palabras.

e) Texto

A) Los encabezamientos de cada sección, numerados correlativamente, serán escritos con letras **minúsculas** en negrita. Los encabezamientos de subsecciones, numerados en la forma 1.1, 1.2, . . . , 2.1, 2.2, . . . , se escribirán en *cursiva*.

B) Las fórmulas estarán centradas y numeradas correlativamente.

C) Las referencias bibliogáficas intercaladas en el texto, deben ser fácilmente identificables en la lista de refencias que aparecerá al final del artículo, bien mediante un número, bien mediante el nombre del autor y año de publicación.

D) Las figuras y tablas, numeradas correlativamente, se intercalarán en el texto. Las figuras se enviarán en formato EPS, o que se pueda convertir a éste con facilidad. Los apéndices, si los hay, se incluirán al final del texto, antes de la bibliografía.

G) Las referencias bibliográficas de artículos deberán contener: Autor: año de publicación, "Título del artículo", *revista* **número**, páginas inicial–final. En el caso de libros, deberá incluirse: Autor: año de publicación, *Título del libro*. Editorial, lugar de publicación.

3 Notas finales

Por cada trabajo publicado, se entregarán al autor o autores un total de 25 separatas. La Revista permite la inclusión de fotografías o figuras en color, con un coste adicional que correrá a cargo de los autores.

Antonio Elipe
Académico Editor

RELACIÓN DE REVISTAS NACIONALES QUE RECIBE EN INTERCAMBIO LA BIBLIOTECA DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS

ACTA BOTANICA BARCINONENSIS
ACTA QUIMICA COMPOSTELANA - Departamento de Química Analítica
AFINIDAD - Revista Química Teórica y Aplicada
ANALES DE BIOLOGIA - Sección de Biología General (Murcia)
ANALES DEL JARDIN BOTANICO DE MADRID
ANALES DE LA REAL ACADEMIA DE DOCTORES
ANALES DE LA UNIVERSIDAD DE MURCIA
ANALES DE CIENCIAS - Facultad de Ciencias (Químicas y Matemáticas) (Murcia)
ANALES SECCION DE CIENCIAS - Colegio Universitario de Girona
ANUARIO DEL OBSERVATORIO ASTRONOMICO - Madrid.
BELARRA. SOCIEDAD MICOLOGICA. Baracaldo.
BLANCOANA - Col. Univ. "Santo Reino" Jaén
BOLETIN DA ACADEMIA GALEGA DE CIENCIAS - (Santiago de Compostela)
BOLETIN DE LA ASOCIACION HERPETOLOGICA ESPAÑOLA
BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO
BOTANICA COMPLUTENSIS - Madrid
BUTLLETI DEL CENTRO D'HISTORIA NATURAL DE LA CONCA DE BARBARA
COLLECTANEA BOTANICA - (Barcelona)
COLLECTANEA MATEMATICA - (Barcelona)
ESTUDIO GENERAL - Revista Colegio Universitario (Girona)
EXTRACTA MATHEMATICAE - Universidad de Extremadura
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES DE JAEN. Monografías.
FOLIA BOTANICA MISCELANEA - Departamento de Botánica (Barcelona)
GACETA DE LA REAL SOCIEDAD MATEMÁTICA ESPAÑOLA
INDICE ESPAÑOL DE CIENCIA Y TECNOLOGIA -
INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA
INVESTIGACION E INFORMACION TEXTIL Y DE TENSIOACTIVIVOS (C.S.I.C.) - Barcelona
LACTARIUS.- BOL. DE LA ASOCIACION MICOLOGICA - Jaen
LUCAS MALLADA - Inst. Est. Altoaragoneses.

MEMORIAS DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS Y ARTES DE BARCELONA
MISCELANEA ZOOLOGICA - Museo Zoológico - Ayuntamiento de Barcelona
NATURALIA BAETICA - Jaen
PIRINEOS
PUBLICACIONES PERIODICAS DE LA BIBLIOTECA DEL MUSEU DE ZOOLOGIA - (Barcelona)
REBOLL.- Bull. Centro d'Historia Natural de la Concha de Barbera.
REVISTA DE LA ACADEMIA CANARIA DE CIENCIAS
REVISTA REAL ACADEMIA GALEGA DE CIENCIAS
REVISTA DE BIOLOGIA DE LA UNIVERSIDAD DE OVIEDO
REVISTA ESPAÑOLA DE FÍSICA
REVISTA ESPAÑOLA DE FISIOLOGIA - Pamplona
REVISTA ESPAÑOLA DE HERPETOLOGIA
REVISTA IBERICA DE PARASITOLOGIA
REVISTA MATEMATICA COMPLUTENSE - (Madrid)
REVISTA DE OBRAS PUBLICAS
REVISTA DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FISICAS Y NATURALES DE MADRID – Matemáticas
REVISTA DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS - QUIMICA - Madrid
RUIZIA - Monografías del Jardín Botánico (Madrid)
SCIENCIA GERUNDENSIS
STUDIA GEOLOGICA SALMANTICENSIA - Universidad de Salamanca
TRABAJOS DE GEOLOGIA - Universidad de Oviedo
TREBALLS DEL CENTRE D'HISTORIA NATURAL DE LA CONCA DE BARBERA.
TREBALLS DE L'INSTITUT BOTANIC DE BARCELONA
TREBALLS DEL MUSEU DE ZOOLOGIA DE BARCELONA
ZOOLOGIA BAETICA. UNIVERSIDAD DE GRANADA.

RELACIÓN DE REVISTAS INTERNACIONALES QUE RECIBE EN INTERCAMBIO LA BIBLIOTECA DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS

ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS - Córdoba. Argentina
ACADEMY OF NATURAL SCIENCES OF PHILADELFIA
ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCIEI - Notiziario
ACCADEMIA UDINESE DI SCIENZI LETTERS ED ARTI.
ACTA ENTOMOLOGICA MUSEI NATIONALIS PRAGAE
ACTA FAUNISTICA ENTOMOLOGICA MUSEI NATIONALIS - Pragae
ACTA GEOLOGICA POLONICA - Warszawa
ACTA MATHEMATICA HUNGARICA
ACTA MATEMATICA SINICA - New Series China
ACTA MUSEI NATIONALI PRAGAE
ACTA ORNITHOLOGICA - Polska Akademia Nauk Warszawa
ACTA PHYSICA - Academia Scientarum Hungaricae
ACTA SOCIETATIS ENTOMOLOGICA BOHEMOSLOVACA
ACTA UNIVERSITATIS - Series: Mathematics and Informatic – University of Nis – Yugoeslavia
ACTA ZOOLOGICA FENNICA
AGRONOMIA LUSITANICA - Est. Agr. Nac. Sacavem - Portugal
AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
ANALES DE LA ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS EXACTAS, FISICAS Y NATURALES DE BUENOS AIRES
ANALES DE LA ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS BIOLOGICAS. México
ANALES DE LA SOCIEDAD CIENTIFICA ARGENTINA
ANALES DE LA ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS BIOLOGICAS - México
ANIMAL BIODIVERSITY CONSERVATION
ANNALEN DES NATURHISTORICHEN MUSEUMS IN WIEN
ANNALES ACADEMIA SCIENTARUM FENNICAE - Serie A - I Matematica - Helsinke
ANNALES ACADEMIA SCIENTARUM FENNICAE - Serie A - II Chemica - Helsinke
ANNALES ACADEMIA SCIENTARUM FENNICAE - III Geologica Geografica - Helsinke
ANNALES ACADEMIA SCIENTARUM FENNICAE - Serie A - IV Physica - Helsinke
ANNALES HISTORICO NATURALES - Musei Nationalis Hungarici

ANNALES DE L'INSTITUT FOURIER - Université de Grenoble
ANNALES DE L'INSTITUT FOURIER - Gap
ANNALES DE LA SOCIETE SCIENTIFIQUE - Serie I - Science Mathematiques Physiques Bruxelles
ANNALES UNIVERSITATIS MARIA CURIE - Sectio A Mathemat. - Sklodowska
ANNALES UNIVERSITATIS MARIA CURIE - Sklodowska - Sectio AA Chemica. Lublin.
ANNALES UNIVERSITATIS MARIA CURIE - Sklodowska - Sectio AAA Physica. Lublin.
ANNALES ZOOLOGICI FENNICI - Helsinki
ANNALI DELLA FACOLTA DE AGRARIA - Universita de Pisa
ANNALI DEL MUSEO CIVICO DI STORIA NATURALE "Giacomo Doria"
ARBOLES Y SEMILLAS DEL NEOTROPICO - Museo Nac. de Costa Rica
ARCHIVIO GEOBOTANICO - Univ de Pavía.
ATTI DELLA ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI. RENDICONTI LINCEI - Matematica e Applicacioni - Roma
ATTI DELLA ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI. RENDICONTI LINCEI - Scienze Fisiche e Naturali - Roma
ATTI DELLA ACCADEMIA DI SCIENZE, LETTERE E ARTI DI UDINE
ATTI DELL'INSTITUTO BOTANICO E DEL LABORATORIO CRITTOGRAMICO DELL'UNIVERSITA DI PAVIA
BAYERISCHE AKADEMIE DR WISSENSCHAFTEN - Munchen
BEITRAGE ZUR FORSCHUNSTECHOLOGIE - Akademie Verlag Berlin
BOLETIM DA SOCIEDADE PARANAENSE DE MATEMATICAS - Paraná
BOLETIM DA SOCIEDADES PORTUGUESA DE CIENCIAS NATURALES - Lisboa
BOLETIN DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS FISICAS, MATEMATICAS Y NATURALES - Caracas
BOLETIN DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS - Córdoba. Argentina.
BOLETIN BIBLIOGRAFICO DE LA ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS BIOLÓGICAS - México
BOLETIN DEL MUSEO NAC. DE COSTA RICA.
BOLETIN DE LA SOCIEDAD MATEMATICA MEXICANA
BOTANY UNIV. OF CALIFORNIA PUBLICATIONS.
BRENESIA - Museo Nacional de Costa Rica
BULGARIAN ACADEMY OF SCIENCES - Scientific Information - CENTRE MATHEMATICAL AND PHYSICAL SCIENCES
BULGARIAN JOURNAL OF PHYSICS
BULLETIN OF THE AMERICAN MATHEMATICAL SOCIETY - Providence
BULLETIN DE LA CLASSE DE SCIENCES - Academie Royale de Belgique - Bruxelles
BULLETIN OF THE GEOLOGICAL INSTITUTION OF THE UNIVERSITY UPSALA

BULLETIN OF THE JSME (Japan Society of Mechanical Engineers)
BULLETIN DE LA SOCIETE SCIENTIFIQUE DE BRETAGNE - Rennes
CALIFORNIA AGRICULTURE - University of California
CIENCIAS TECNICAS FISICAS Y MATEMATICAS. Academia de Ciencias. Cuba.
COLLOQUIUM MATHEMATICUM - Warszawa
COMMENTATIONES MATHEMATICAE - Ann. So, Mathematicae Polonese
COMPTES RENDUS DE L'ACADEMIE BULGARE DE SCIENCES - Sofia
DARWINIANA REV. INST. BOTANICA DARWINION - República Argentina
DORIANA - Supplementa agli Annali del Museo Civico di Storia Naturale "G. Doria" - Cenova
ESTUDOS, NOTAS E TRABALHOS DO SERVIC DE FOMENTO MINERO - Portugal
ESTUDOS, NOTAS E TRABALHOS, DIECCIÓ GERAL DE GEOLOGIA E MINAS - Porto
FILOMAT - FACTA UNIVERSITATIS - Univ. af Nis.
FÍSICA DE ONDAS ACÚSTICAS Y ELECTROMAGNÉTICAS LINEALES - Acad. Búlgara de las Ciencias
FOLIA ANATOMICA UNIVERSITATIS CONIMBRIGENSIS - Coimbra
FOLIA ZOOLOGICA - Czechoslovak Academy of Sciences
FUNCTIONS ET APPROXIMATIC COMMENTARI MATHEMATICI - Poznań
GLASNIK MATEMATICKI - Zagreb
IBC - INFORMAZIONI - Rivista Bimestrale Inst. Beni. Artistic. - Regione Emilis-Romagna
INSTITUTO DE MATEMATICA - Univ. Nac. del Sur - Bahia Blanca - Argentina
INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGAÇAO AGRARIA - Estaçao AGRONOMICA NACIONAL OEIRAS INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO DE CIENFUEGOS
INTERNATIONAL TIN RESEARCH INSTITUTE
JAHRBUCH DER AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN IN GÖTTINGEN.
JOURNAL OF THE AMERICAN ACADEMY OF ARTS AND SCIENCES - Daedalus
JOURNAL OF THE BULGARIAN ACADEMY OF SCIENCES
JOURNAL OF THE LONDON MATHEMATICAL SOCIETY
JOURNAL OF NON-CRYSTALLINE SOLIDS - Amsterdam
LESTURAS MATEMATICAS - Colombia
MATHEMATICA BALKANICA
MATHEMATICA MONTISNIGRA
MEMORABILIS ZOOLOGICA
MEMORANDA SOCIETATIS PROFAUNA ET FLORA FENNICA - Helsingfors
MEMORIAS DA ACADEMIA DAS CIENCIAS DE LISBOA (Classe de Ciencias)
MITTEILUNGEN AUS DEN ZOOLOGISCHEN MUSEUM IN BERLIN

MONOGRAFIAS DE LA ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS EXACTAS, FISICAS Y NATURALES DE BUENOS AIRES
NACHRICHTEN DER AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN IN GUTTINGEN - II Matemáticas y Física
NATURAL HISTORY MUSEUM UNIV. OF KANSAS.
NEOTROPICO - Museo Nacional de Costa Rica
NETHERLANDS JOURNAL OF ZOOLOGY
NONLINEARITY - Inst. Physics and London Math. Soc
NOTAS DE ALGEBRA Y ANALISIS - Ins. de Matematica - Univ. Atac. del Sur. Bahia Blanca
NOTULAE NATURAE
NUCLEAR ENERGY -Bulgarian Academy of Sciences
OCCASIONAL PAPERS OF THE CALIFORNIA ACADEMY OF SCIENCES - San Francisco
PHILIPPINE JOURNAL OF SCIENCES - Manila
POLISH ACADEMY OF SCIENCES. INSTITUTE OF MATHEMATICA
POLSKA AKADEMIE NAUK-PRACE GEOLOGICZNE
POLSKA AKADEMIE NAUK-PRACE MINERALOGICZNE
PORTUGALIA PHYSICA - Sociedade Portuguesa de Física
PROCEEDINGS OF THE ACADEMY OF NATURAL SCIENCES OF PHILADELPHIA
PROCEEDINGS OF THE CALIFORNIA ACADEMY OF SCIENCES
PROCEEDINGS OF THE LONDON MATHEMATICAL SOCIETY
PROCEEDINGS OF THE ROCHESTER ACADEMY OF SCIENCES
PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY OF LONDON - A: Mathematical and Physical Sciences
PROCEEDINGS OF THE ROYAL SCOIETY OF EDINBURGH - Section A (Mathematical and Physical Sciences)
PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY OF QUEENSLAND
PUBLICACIONES FUNDAMENTALES DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE SOFIA
PUBLICATION DE L'INSTITUT DE RECHERCHE MATHEMATIQUE AVANCEE - Strasbourg
PUNIME MATEMATIKE - Prishtine
QUADERNI DELL' ACADEMIA UDINESA.
QUATERLY OF APPLIED MATHEMATICS
REVISTA CUBANA DE FISICA
REVISTA COLOMBIANA DE MATEMÁTICAS

REVISTA DE LA FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA- Univ. Nal. del Litoral - Argentina
REVISTA TRIMESTRAL DEL INTERNATIONAL TIN RESEARCH INSTITUTE
REVISTA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA - Argentina
REVISTA DE LA UNION MATEMATICA ARGENTINA
REZIMEA ABSTRACS - POGDORICA
SCIENCE BULLETIN - University of Kansas
SCIENTIFIC PAPERS NAT. HISTORY MUSEUM. The University Kansas.
SEARCH AGRICULTURAL ITHACA NEW YORK
SENCKENBERGIANA BIOLOGICA - Frankfurt
SENCKENBERGIANA LETHAEA - Frankfurt
SMITHSONIAN CONTRIBUTIONS TO PALEONTOLOGY
SPECTRUM - Akademie der Wissenschaften der DDR
STUDIA GEOLOGICA POLONICA - Polska Akademy Nauk Warsovia
SUT JOURNAL OF MATHEMATICS - Science University of Tokio
T. KOSCIUSZKI TECHNICAL - Univesity of Cracow
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA - Notas del museo de la Plata
UNIVESITY OF THE STATE OF NEW YORK - Bulletin
UNIVERSITY OF KANSAS PALEONTOLOGICAL CONTRIBUTIONS
VERTEBRATOLOGICKE ZPRAVY CESKOLOVENSKA AKADEMIE BRNO
ZBORNIK RADOVA FILOZOFSKOG - Fakulteta u Nisu-Serija Matematika
ZBORNIK - Acta Musei Nationalis - Pragae
ZOOLOGICA POLONIAE
ZPRAVY USEB (Vertebralogy zpravy) - Brno - Checoslovaquia