



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

-Facultad de Ciencias-

“ORIGEN DE LA QUIRALIDAD BIOLÓGICA
COMO UN SISTEMA AUTOORGANIZADO”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGÍA EXPERIMENTAL)

P R E S E N T A

HUGO IVAN CRUZ ROSAS

TUTOR PRINCIPAL DE TESIS: DR. GERMINAL COCHO GIL

COMITÉ TUTOR: DR. PEDRO EDUARDO MIRAMONTES VIDAL
DR. ARTURO CARLOS II BECERRA BRACHO

MÉXICO, D.F.

Noviembre, 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

OFICIO FCIE/DEP/627/11

ASUNTO: Oficio de Jurado

Dr. Isidro Ávila Martínez
Director General de Administración Escolar, UNAM
P r e s e n t e

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día **3 de octubre de 2011** se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGÍA EXPERIMENTAL)** del (la) alumno (a) **CRUZ ROSAS HUGO IVÁN** con número de cuenta **300048052** con la tesis titulada "**Origen de la quiralidad biológica como un sistema autoorganizado**", realizada bajo la dirección del (la) **DR. GERMINAL COCHO GIL**:

Presidente: DR. PEDRO EDUARDO MIRAMONTES VIDAL
Vocal: DR. ABEL MORENO CÁRCAMO
Secretario: DR. MANUEL JESÚS FALCONI MAGAÑA
Suplente: DR. ARTURO CARLOS II BECERRA BRACHO
Suplente: DR. THOMAS BUHSE

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 9 de noviembre de 2011

M. del Coro Arizmendi Arriaga
Dra. María del Coro Arizmendi Arriaga
Coordinadora del Programa

MCAA/MJFM/ASR/ ipp

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente al Posgrado en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por ser un espacio donde se me ha brindado la oportunidad de desarrollar mis ideas por medio de este trabajo.

A continuación, agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca de manutención (con CVU: 327298, y número de becario: 233810), otorgada durante los dos años de la maestría. Tiempo en que esta tesis fue desarrollada.

También agradezco al Instituto de Física de la UNAM, por el apoyo que me ha brindado como estudiante asociado.

Un agradecimiento especial al jurado que revisó este trabajo: Dr. Thomas Buhse, Dr. Manuel Falconi Magaña, Dr. Abel Moreno Cárcamo, Dr. Arturo Becerra Bracho y Dr. Pedro Miramontes Vidal: por sus comentarios y tener la paciencia de leer este escrito. Aunque no en todo podemos estar de acuerdo, pero siempre muy valiosos sus comentarios: Muchas gracias, en verdad.

Del mismo modo, agradezco enormemente a México, como sociedad y pueblo: por mantener una identidad y un proceso históricos que sin ellos, nada de las ideas que en este trabajo se definen tendrían sentido.

Gracias.

*“Las diferentes concepciones al respecto del origen de la vida son parte,
en cada etapa histórica de la sociedad, de la concepción biológica global
que cada clase social históricamente dominante ha tenido o tiene”*
(Colectivo Ciencia y Sociedad.
Facultad de Ciencias, UNAM. 1973)

AGRADECIMIENTOS A TÍTULO PERSONAL

La ciencia del llamado Tercer Mundo debe liberarse de las trabas económicas que el Primer Mundo le ha impuesto. Debe definir sus propios métodos y sus propias vías, y dejar de intentar ser una copia de los supuestos países “desarrollados”.
noviembre, 2011

Agradezco enormemente a mis profesores: Dr. Germinal Cocho Gil y Dr. Pedro Miramontes Vidal, por dejarme aprender de ellos, apoyarme, y por intercambiar sus ideas conmigo, no sólo en cuanto a los aspectos científicos, sino también en los sociales; y por no permitirme olvidar que en este mundo, antes de ser uno cualquier cosa, somos personas y procesos históricos.

Muchas gracias al Dr. Arturo Becerra Bracho: por sus comentarios y guía sobre la primera versión de esta tesis, y por aceptar ser parte de mis tutores.

Parecería ilógico no agradecer a mis padres: Pedro Cruz Gómez y María Isabel Rosas Pérez, por todo su apoyo, su amor, por siempre hacer el intento de entenderme... Y por ello, aquí lo hago: los quiero mucho, son de quienes he aprendido lo mejor de este mundo.

También agradezco con los brazos abiertos a mis hermanos: Oscar y Ariana, y a mis sobrinos: Esteban, Amellaltzin y “Choco”... Sin ustedes difícilmente habría podido sonreír como lo hago desde la primera hora del día en que los veo hacerlo con tal facilidad.

Un agradecimiento entre copal y tambores que llegan hasta el Mictlan para mis abuelas y abuelo: Guadalupe Pérez, Andrés Luna, Petra Gómez y Albina Cruz.

Gracias a Mariel: porque siempre has estado para recordarme que hay gente excepcional, porque tus manos siempre me han apoyado, y con ellas me has enseñado a caminar por las calles disfrutando de los colores que se evaporan del suelo y quedan atorados entre los árboles: gracias...

Gracias a mis tías y mis tíos, a mis primos y primas y a todos mis familiares: porque siempre que han podido, no han dejado escapar la oportunidad de demostrarme su apoyo.

Gracias a mis amigos y amigas: por darle sentido a todo, por las pláticas, por los momentos que hemos juzgado como fáciles y hemos reído, y por los que en su momento nos han parecido difíciles y hemos logrado apoyarnos: Oliver, Roberto, Paco, Mauricio, Abraham, Laura, José Roberto, Eduardo, Auri, Eduardo Coiro, Juan Carlos, Octavio, Erandi, Javier, S, M, V, R, H, S, M, EZ, PF, JR, RFM...

“El fanatismo ha tenido gran cuidado de disociar la Ciencia y sus ramas, dividir al enemigo para vencerlo, aislarlas de la literatura y la filosofía, el arte y la poesía, debiendo, al contrario, formar un todo lleno de belleza y atractivo, penetrando así en el corazón del pueblo y unificando los dones y anhelos del pensamiento...”
(Alfonso Luís Herrera. 1932)

“Aunque no se conozca, existe el número de las estrellas y el número de los granos de arena. Pero lo que existe y no se puede contar y se siente aquí dentro, exige una palabra para decirlo. Esta palabra, en este caso, sería inmensidad. Es como una palabra húmeda de misterio. Con ella no se necesita contar ni las estrellas ni los granos de arena. Hemos cambiado el conocimiento por la emoción: que es también una manera de penetrar en la verdad de las cosas”

(Ermilo Abreu Gómez. 1940)

Dedico esta tesis al día **15 de noviembre del año de 1990:**
por haber sido un día que pasó sin que me diera cuenta,
y porque hasta hoy que escribo esta dedicatoria,
no logro recordar en lo más mínimo lo que hice en aquella ocasión.

ÍNDICE

	Págs.
I. Resumen	1
II. Introducción y justificación	4
III. Hipótesis	8
IV. Objetivos	9
V. Desarrollo de la Teoría	
V.I PROPUESTA 1: Nanotubos quirales de Streckerno, putativamente presentes en la superficie de condritas carbonáceas, pueden ser considerados como una fuente de asimetría alternativa a la LPC para inducir RES en los aminoácidos meteoríticos....	10
V.II PROPUESTA 2: La condición homoquiral en los péptidos y ácidos nucleicos, les confiere a estos polímeros la capacidad de almacenar información para soportar la emergencia de un sistema biogénico	61
VI. Discusión	84
VII. Conclusiones	93
VIII. Bibliografía	94
IX. Anexos	
IX. I AUTOORGANIZACIÓN Y PROPIEDADES EMERGENTES	98
IX. II SISTEMAS COMPLEJOS	101
IX. III REACCIÓN DE SOAI	103
IX. IV SÍNTESIS DE STRECKER	105

I. RESUMEN

La presente tesis se trata de un trabajo teórico que tiene por objetivo primordial presentar y sustentar la propuesta de la existencia de un sustrato quirál asimétrico, compuesto por nanotubos quirales de carbono, como un recurso alternativo a la Luz Polarizada Circularmente (LPC). Además, la propuesta también original de que la capacidad de almacenar información por parte de los sistemas vivos, es una propiedad soportada por la condición homoquiral presente en sus polímeros biológicos (péptidos y ácidos nucleicos), es desarrollada y presentada teóricamente con base en algunas evidencias iniciales que lo sugieren.

Ambas hipótesis originales se basan en trabajos previos a la presente tesis, reportados en la bibliografía, los cuales han dado paso a estas propuestas. Sin embargo, la argumentación y definición aquí presentadas son un aporte novedoso y una primera aproximación teórica que, de confirmarse, tienen fuerte impacto en la resolución del problema del origen de la quiralidad biológica y sus consecuencias para el origen y desarrollo de la vida.

Trabajos experimentales y teóricos considerando la irradiación con LPC de mezclas racémicas (Balavoine *et al.*, 1974; Bonner y Flores, 1975), han justificado el escenario de la Ruptura Espontánea de la Simetría (RES) en aminoácidos detectados en el tipo de meteoritos llamados condritas carbonáceas, aludiendo al influjo de la radiación sincrotrónica al rededor de una estrella de neutrones (supernova) provocando la irradiación de LPC sobre la superficie de los meteoritos y otros cuerpos interestelares (Bonner y Rubenstein, 1987), causando los excesos L-enantioméricos observados (Cronin y Pizzarello, 1997; Pizzarello, 2007). A pesar de que dicho escenario se sustenta en resultados experimentales, muestra inconsistencias cuando se emplean mezclas racémicas de diferentes especies de aminoácidos, o cuando un sólo tipo de éstos se irradia con un espectro amplio de LPC. Esta inconsistencia se debe al fenómeno del dicroísmo circular (DC). Para resolver este problema se realiza la primer propuesta de esta tesis: la existencia de un sustrato asimétrico, capaz de inducir la síntesis asimétrica de aminoácidos, a partir de reacciones químicas quirales presentes sobre la superficie de meteoritos (como la síntesis de Strecker), e inducir la RES a favor del L-enantiómero, confirmando un papel predominante a las interacciones heterogéneas entre el sustrato simétrico y la molécula quirál, el cuál se fundamenta en interacciones de complementación espacial. Los resultados de diversos trabajos que sustentan esta propuesta son revisados y discutidos dentro del marco de la presente tesis.

La segunda propuesta original que aquí se hace, se desarrolla como una hipótesis teórica por medio de la cual se le otorga un papel fundamental a la homoquiralidad biológica en los polímeros informacionales. Proponiendo que la capacidad de almacenar información en los sistemas vivos, se sustenta en un tipo especial de organización de sus elementos moleculares, y dicha organización se trata de la condición homoquiral en los L-aminoácidos constituyentes de las proteínas y la D-ribosa y D-desoxirribosa presente en el RNA y DNA, respectivamente. Los resultados de los trabajos que inicialmente sugieren esta hipótesis son revisados y discutidos desde este punto de vista, como un aporte teórico para definir un elemento a considerar seriamente en las teorías sobre el origen y desarrollo de la vida: que la condición homoquiral es la base material para la emergencia de la

capacidad de almacenar información en los sistemas vivos, como un proceso no lineal en la interacción entre componentes moleculares capaces de definir y mantener una condición homoquiral.

Palabras Clave: Homoquiralidad Biológica, Autoorganización, Sistemas Complejos, Sistema Biogénico, Origen de la Vida.

I'. ABSTRACT

This is a theoretical work whose principal objective is to present and validate the propose of the existence of an asymmetric chiral substrate, made of chiral carbon nanotubes, as an alternative asymmetric resource of the Circularly Polarized Light (CPL). Moreover, the original proposed about the biologicals polymers (peptides and nucleic acids) homochirality as the base of the organisms ability to store information is theoretically presented and supported by some early evidences that suggest it.

Both of this original proposes are based on previous papers that expose some results suggesting them; nonetheless, those papers did not imply the new argumentation and refreshed definitions present in this thesis. In addition, they are a first and theoretical approach that, if they get confirmed, could strongly change the origin of biological homochirality problem and their consequences for the origin and development of life.

Experimental and theoretical papers considering CPL irradiation of racemic mixtures (Balavoine *et al.*, 1974; Bonner and Flores, 1975), have justified the Spontaneous Breaking Symmetry (SBS) scenery in aminoacids, detected in the kind of meteorite called carbonaceous chondrites, validating the synchrotron radiation influx around a neutron star (supernovae) causing the CPL irradiation on the meteorite surface and other interstellar bodies (Bonner and Rubenstein, 1987), making the L-enantiomeric excess observed (Cronin and Pizzarello, 1997; Pizzarello, 2007). Although, this scenery is based on experimental results, it shows incongruence when racemic mixtures of several amino acids or just one type of these are irradiated with an whole spectrum CPL. This incongruence is caused by the circular dichroism (CD) phenomenon. In order to solve this problem, the general propose of this thesis is stated: the existence of an asymmetric substrate, able to induce the asymmetric synthesis of aminoacids, from achiral chemical reactions present on the meteoritic surface (as the Strecker synthesis), and induce the SBS bias L-enantiomere, emphasizing the role of heterogeneous interactions between asymmetric substrate and chiral molecules, based on spacial complementation interactions. The results of several researches supporting this propose are reviewed and discussed in this thesis.

The second original propose stated here, is developed as a theoretical hypothesis that gives a key role to biological homochirality in polymers able to save information. Here is proposing that the ability of living systems to store information is based on a specific

organization between his molecular elements, where the homochirality is this kind of organization both the L-amino acids which constitute proteins and the D-rybose and D-deoxyribose present in RNA and DNA, respectively. The results of works which suggested this hypothesis are reviewed and discussed from this ideas, as a theoretical contribution to define element to consider seriously in the theories about the origin and development of life: the homochirality in an biogenic informational system is the material base to the emergence of the biological dynamic in the prebiotic systems, as a nonlinear process in the interaction between molecular components able to keep and define the homochiral condition.

Key Words: Biological Homochirality, Selforganization, Complex Systems, Biogenic System, Origin of Life.

II. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Los hallazgos de excesos L-enantioméricos presentes en los aminoácidos de meteoritos, las llamadas condritas carbonáceas, han mostrado la existencia de fenómenos asimétricos actuando sobre la materia orgánica en el espacio interestelar. Este hallazgo ha soportado la idea de que estos fenómenos pueden influir en los procesos físicos y químicos nativos de algún planeta al cuál impactan estos cuerpos interestelares, modificando el ambiente químico creando un sesgo asimétrico, por lo menos en este tipo de moléculas orgánicas. Este exceso de L-aminoácidos meteoríticos representa una correlación interesante con los sistemas vivos, pues éstos presentan un uso casi exclusivo de L-aminoácidos en la construcción de sus proteínas, presentando el uso de D-aminoácidos en procesos postraduccionales y modificaciones posteriores a la síntesis lineal del péptido; definiendo de este modo una condición homoquiral en este tipo de polímeros.

Por su parte, el uso exclusivo en los ácidos nucleicos de D-ribosa (para el RNA) y D-desoxirribosa (para el DNA), muestra que esta condición homoquiral no es exclusiva para las proteínas, ni para la quiralidad levógira en los organismos vivos, definiéndose de este modo un ambiente homoquiral para estos polímeros en los sistemas biológicos, que se manifiesta como una propiedad distintiva de la vida. En este contexto se habla del origen de la quiralidad biológica, como el conjunto de eventos que dieron inicio a este orden en los polímeros biológicos, provocando una ruptura de la simetría, y alejándolos del equilibrio.

Incluyendo además la homoquiralidad que también se presenta en los D-azúcares que entran a las principales rutas metabólicas, podría decirse que la condición homoquiral es una propiedad distintiva para la estructura interna de un sistema biológico, cuya asimetría permite la asociación ordenada de los elementos moleculares, y el establecimiento de redes de interacción. Se hace evidente, además, que la condición homoquiral en un sistema debió de haber partido de un ligero pero significativo exceso enantiomérico, que le otorgara la asimetría necesaria para el desarrollo de esta condición; y dado que un sistema de esta naturaleza (asimétrico), es un sistema ordenado y, por lo tanto, desequilibrado, este inicio de la asimetría quiral debió darse de manera abrupta, permitiendo al sistema una inercia capaz de alejarlo del equilibrio, hablándose de este modo de una ruptura espontánea de la simetría que fue capaz de originar el exceso enantiomérico inicial para el desarrollo posterior de la condición homoquiral en los sistemas vivos.

Con esta serie de consideraciones, las teorías que intentan explicar el origen de esta quiralidad biológica se basan en la búsqueda de procesos que puedan provocar rupturas espontáneas de la simetría, capaces de generar el suficiente exceso enantiomérico (EE) para, de darse las interacciones necesarias, permitir la posterior condición homoquiral en un sistema (vivo). De este modo, las diferentes teorías pueden dividirse en dos grandes formas para considerar el fenómeno: aquellas que conciben la asimetría en los organismos vivos como una consecuencia de su misma actividad, es decir, que consideran la ruptura espontánea de la simetría como un hecho posterior y provocado por el inicio y evolución de la vida; y aquellas que conciben esta asimetría como el producto de una ruptura espontánea de la simetría previa al origen de la vida, provocada por fenómenos abióticos. Los hallazgos de excesos L-enantioméricos de aminoácidos en las condritas carbonáceas (Cronin y Pizzarello, 1997; Pizzarello, 2007), al ser producto de procesos en el espacio interestelar,

soportan la concepción de la ruptura espontánea de la simetría como un hecho previo a la aparición de la vida, e influido por el aporte asimétrico de materia orgánica (aminoácidos), proveniente de este espacio interestelar.

Dentro de esta perspectiva, los excesos L-enantioméricos en los aminoácidos de meteoritos representan un parámetro importante a explicar, vinculado estrechamente al caso de los sistemas prebióticos. Es así como la búsqueda de procesos que provoquen excesos enantioméricos, a partir de mezclas racémicas, con valores similares a los observados para los aminoácidos meteoríticos, ha tomado como referencia fenómenos que puedan actuar en el espacio cósmico sobre la superficie de estos cuerpos interestelares. Los resultados favorables que se han logrado en distintos laboratorios, empleando la luz polarizada circularmente como fuente de asimetría para inducir RES sobre mezclas racémicas, han dado un sólido sustento experimental a la propuesta de que una fuente de LPC actuando en el espacio interestelar, como lo es una estrella de neutrones, bien puede ser la responsable de la asimetría observada sobre la superficie de los meteoritos (Bonner y Rubenstein, 1987).

Este escenario es el que ha tenido mayor desarrollo y aceptación dentro de la comunidad científica, y el que actualmente dirige la gran mayoría de las investigaciones. Sin embargo, no se ha podido constituir como una prueba definitiva debido a algunos problemas aún por resolver, como que no se ha encontrado una estrella de neutrones que pueda irradiar esta luz polarizada circularmente que esté cercana al Sistema Solar al cuál pertenece la Tierra, o que la longitud de onda ultravioleta en este tipo de luz polarizada, necesaria para que los aminoácidos puedan absorberla, no ha sido reportada. Posiblemente este tipo de problemas sean resueltos con el tiempo y conforme se avanza en los instrumentos de detección empleados en las investigaciones astronómicas. Sin embargo, un problema fundamental, el cuál no puede ser resuelto con el avance tecnológico, es aquel que se origina con el fenómeno del dicroísmo circular.

Las RES obtenidas sobre mezclas racémicas irradiadas con LPC han sido logradas empleando un sólo tipo de molécula quiral y una longitud de onda específica, o un espectro de irradiación muy limitado; pero al incluir en los experimentos mezclas racémicas de diversos tipos moleculares, cada molécula quiral presenta una preferencia por parte de uno de sus enantiómeros, a absorber la LPC de cierta longitud de onda, generando bandas de absorción de diferente signo (+ o -), dependiendo de si es el enantiómero levógiro o dextrógiro el que presenta una mayor absorción de la luz. El dicroísmo circular es un fenómeno por medio del cuál es posible comparar las magnitudes de las absorbancias de una molécula quiral por medio de una resta entre sus coeficientes de absorción de la LPC, lo que permite establecer el sentido de la RES hacia uno u otro enantiómero al ser irradiada una mezcla racémica de aminoácidos quirales, para cada tipo de éstos. Además, los valores del dicroísmo circular para cada molécula dependen de la longitud de onda empleada, y varían dependiendo de la que se use, alternando en signos dentro de un espectro amplio de irradiación y pudiendo sumar cero en un espectro amplio de absorción, manteniendo la condición racémica en una mezcla.

De este modo se ha podido determinar que, aunque cada aminoácido de manera individual y al ser irradiado con una longitud de onda de LPC, es capaz de romper su simetría quiral a

favor del enantiómero levógiro, la combinación de varios tipos de aminoácidos en proporciones racémicas en una mezcla, así como un espectro más o menos amplio de irradiación, dan valores opuestos en las bandas de absorción del dicroísmo circular, presentando RES hacia la derecha en algunos aminoácidos, y RES hacia la izquierda en otros; sumándose de manera algebraica y anulándose, provocando que la mezcla global, aún cuando existan excesos enantioméricos para cada aminoácido particular, permanece racémica o con una asimetría muy baja, fácilmente racemizable.

Este problema medular ha provocado que el conjunto de aminoácidos que pudiera haber formado parte de la mezcla original que dio paso a la condición homoquiral en los sistemas vivos, aún no haya sido determinado y ha comenzado a sugerir a algunos grupos de trabajo que la LPC quizás no fue la causante de la asimetría observada en los aminoácidos de meteoritos (Vandenbussche *et al.*, 2011).

Ante este problema, y con base al hallazgo reportado de un componente orgánico macromolecular de configuración R (correspondiente a la configuración D), sobre la superficie de condritas carbonáceas (Kawasaki *et al.*, 2006), proponemos una vía alternativa para considerar un escenario interestelar que *explique* la asimetría observada en estos meteoritos, abordado el problema de manera teórica como la convergencia de dos procesos frecuentes en la química del Universo, y que confluyen sobre superficies meteoríticas: la síntesis abiótica de aminoácidos por un lado, y por el otro, la síntesis de un sustrato orgánico asimétrico en las regiones circunestelares, compuesto por nanotubos quirales de carbono.

Proponemos que la existencia de un sustrato quiral asimétrico, de configuración opuesta a la de los L-aminoácidos, y presente sobre la superficie de condritas carbonáceas, es la responsable de inducir una ruptura espontánea de la simetría sobre mezclas racémicas de aminoácidos meteoríticos, hacia dicha configuración levógira por medio de la complementación estereoquímica. Planteamos que dicho sustrato asimétrico se trata de nanotubos de carbono quirales, con un exceso D-enantiomérico, basándonos en el trabajo de Kawasaki *et al.* (2006).

Por su parte, el descubrimiento de estos excesos L-enantioméricos (L-ee) en las condritas carbonáceas, ha justificado las propuestas de quienes consideran el origen de la condición homoquiral como un fenómeno previo a la aparición de la vida sobre la Tierra, inicialmente provocado por un aporte asimétrico de aminoácidos quirales provenientes del espacio interestelar (Pizzarello, 2007). Este aporte asimétrico de L-aminoácidos durante el periodo de acreción de la Tierra (Bonner y Rubenstein, 1987), es necesario precisar que no implica la inoculación de vida extraterrestre, sino solamente el aporte de materia orgánica, los α-aminoácidos, con excesos L-enantioméricos observados en los meteoritos, que muy posiblemente tuvo influencia sobre la dinámica en las interacciones moleculares nativas de la Tierra (Ehrenfreund y Charnley, 2000).

Esta influencia asimétrica nos permite proponer la segunda hipótesis de este trabajo: la homoquiralidad con la que los polímeros biológicos capaces de almacenar información se fundamentan: proteínas y ácidos nucleicos, es el tipo de organización interna al sistema que le permite manifestar su propiedad de almacenar información. Esta hipótesis teóricamente

aquí planteada es presentada como una primera propuesta, basándonos en el trabajo de Carroll (2010) y los hallazgos realizados por Miramontes *et al.*, (1995) y Aldana-González *et al.*, (2003), quienes nos sugieren, al hacer una reinterpretación de sus resultados, la existencia de un patrón de organización en los genomas de organismos vivos que bien puede ser debida a la condición homoquiral en ellos presente, como un tipo específico de organización que permite el almacenamiento de información.

De este modo, al proponer esta hipótesis teórica aportamos argumentos a considerarse seriamente sobre la relevancia de la homoquiralidad en el establecimiento de un sistema vivo, y el proceso evolutivo o histórico por medio del cuál una alta pureza enantiomérica es desarrollada a la par de que se desarrolla la capacidad de almacenar información, y un sistema biogénico es definido. En este sentido se discuten los resultados existentes en la bibliografía, con el objetivo de definir el escenario teórico al cuál puedan dirigirse futuros experimentos y simulaciones *in silico*.

Esta propuesta original se hace considerando que hasta ahora el argumento del carácter oportunista de la vida, donde emplear L-aminoácidos representa una mera “estrategia” para utilizar recursos abundantes en el medio, es el único seriamente planteado; enriqueciendo de este modo la argumentación sobre el fenómeno, donde en este trabajo se considera esta asimetría quiral en el ambiente prebiótico como una condición que favorece el establecimiento de un tipo de organización en un sistema potencialmente biogénico: la homoquiralidad en sus polímeros capaces de almacenar información, que les permite manifestar de manera efectiva esta propiedad dentro del sistema.

A continuación se desarrolla el contexto teórico que soporta las dos propuestas de esta tesis, revisando los resultados existentes en la bibliografía y discutiéndolos críticamente dentro de las propuestas que aquí son presentadas de manera original.

III. HIPÓTESIS

1.- Si existe un componente macromolecular asimétrico en el material orgánico insoluble de las condritas carbonáceas, de quiralidad opuesta a la de los L-aminoácidos, los cuáles se encuentran presentes de igual modo con una asimetría L-enantiomérica en este tipo de meteoritos, entonces la interacción entre ambos constituyentes moleculares puede darse en la superficie meteorítica, siendo esta superficie quiral el sustrato para inducir y posiblemente estabilizar la ruptura espontánea de la simetría a favor de los L-aminoácidos, por acción de interacciones electrostáticas establecidas en el sistema. Proponiendo que, en particular, esta superficie quiral se trata de nanotubos de carbono con un exceso enantiomérico hacia su configuración R, adheridos a la superficie de las condritas carbonáceas; pero que en general, potencialmente cualquier superficie quiral puede funcionar como sustrato para inducir y/o estabilizar la ruptura espontánea de la simetría.

2.- Si la homoquiralidad presente en los polímeros informacionales de los sistemas vivos les confiere un modo particular de organización que soporta la capacidad de almacenar información en ellos, entonces podrá ser encontrada una dinámica incipiente al analizar resultados obtenidos por medio del análisis de genomas reales y comparar las secuencias codificantes y no codificantes entre sí, y con secuencias azarosas.

IV. OBJETIVOS

IV. I. GENERALES

- 1.- Definir y justificar teóricamente la propuesta de la presencia de un sustrato asimétrico, constituido por nanotubos quirales de carbono, como una fuente de asimetría alterna a la LPC, capaz de inducir la RES en aminoácidos meteoríticos.
- 2.- Presentar y aportar las evidencias y argumentos teóricos, para proponer a la condición homoquiral de los polímeros biológicos capaces de almacenar información, como el tipo de organización entre sus elementos moleculares quirales, que les permite manifestar efectivamente dicha propiedad de ser portadores de información.
- 3.- Proponer posibles métodos experimentales para probar las dos hipótesis de este trabajo; ya sea por métodos de laboratorio o por simulaciones *in silico*.

IV. II. PARTICULARES

- 1.- Desarrollar el contexto teórico que permita sustentar la proposición de protocolos experimentales que dirijan la búsqueda de nanotubos de carbono quirales sobre condritas carbonáceas.
- 2.- Mostrar con datos teóricos que la presencia de una superficie quiral es capaz de inducir y posiblemente estabilizar un exceso enantiomérico de quiralidad opuesta en los aminoácidos.
- 3.- Evidenciar que la simetría propia de la vida puede ser generada por procesos abióticos en un contexto interestelar, sobre la superficie de meteoritos. Estos procesos definen, en sí, una incipiente dinámica de interacción, una red, que puede ser un precedente de la dinámica en los sistemas biológicos.
- 4.- Proponer y desarrollar la idea de que la autoorganización de la materia, en este caso a partir de una condición homoquiral, es capaz de sustentar y dar paso a nuevas propiedades emergentes tan novedosas, como lo es la vida en los sistemas biológicos al permitirles manifestar en sus polímeros la propiedad de almacenar información.

V. DESARROLLO DE LA TEORÍA

V. I. PROPUESTA 1: Nanotubos quirales de carbono, putativamente presentes en la superficie de condritas carbonáceas, pueden ser considerados como una fuente de asimetría alternativa a la LPC para inducir RES en los aminoácidos meteoríticos.

Panorama General

En primer lugar, es necesario enfatizar que los excesos L-enantioméricos en aminoácidos de meteoritos son un parámetro de referencia para explicar la ruptura espontánea de la simetría en los sistemas vivos:

A partir de los primeros reportes de la presencia de aminoácidos en los meteoritos del tipo condriticos con una alta composición de material orgánico (Han *et al.*, 1969; Cronin y Moore, 1976), las llamadas condritas carbonáceas que han caído sobre la Tierra, han sido desarrollados trabajos que han detectado un ligero pero significativo desbalance asimétrico a favor de los L-aminoácidos (Cronin y Pizzarello, 1997; Pizzarello y Cronin, 2000; Pizzarello *et al.*, 2003), los cuáles han sido demostrados de origen extraterrestre, y no contaminación biológica por organismos autóctonos de la Tierra (Epstein *et al.*, 1987; Egel y Macko, 1997; Pizzarello y Huang, 2005). De este modo la correlación existente entre los L- α -metil aminoácidos meteoríticos y los L- α -aminoácidos empleados por los sistemas vivos para la síntesis de proteínas, han sido abordados como fenómenos asimétricos relacionados con procesos generales de rupturas de la simetría quiral, actuando tanto en las superficies meteoríticas en el medio interestelar, como en las etapas más relacionadas con el inicio y evolución de los sistemas biológicos en el ambiente prebiótico terrestre.

Esta condición asimétrica presente en los sistemas vivos es considerada como una propiedad clave y distintiva de estos sistemas, al otorgarles un orden interno no sólo en cuanto a la estructura y organización soportada por sus elementos moleculares, sino además en cuanto al uso de un tipo preferencial de estructura en la geometría de sus moléculas de soporte, como lo son los aminoácidos que conforman las macromoléculas protéicas. En este sentido es que las teorías actuales que intentan dar una explicación viable para el origen de la vida, toman necesariamente en consideración el origen de la condición homoquiral, tanto en los ácidos nucleicos como en los péptidos; ya sea considerándolo como un suceso previo o un suceso posterior al origen de la vida. De este modo, puede ser abordado el problema del origen de la vida desde el problema del origen de la quiralidad biológica, en el sentido en que dar los argumentos del por qué puede ser considerado un fenómeno posterior al origen de los sistemas vivos, implica definir argumentos por medio de los cuáles el primer sistema biogénico era racémico, y el dar los argumentos del por qué puede ser considerado como un fenómeno que tiene su origen en un momento previo a la aparición de la vida, implica definir una teoría por medio de la cuál esta asimetría pueda ser generada para dar paso a un sistema biogénico.

Con los excesos L-enantioméricos (L-ee) encontrados en los aminoácidos (aa) meteoríticos, la postura que considera el origen de la quiralidad biológica como un suceso previo a la aparición de los sistemas vivos no sólo obtiene sustento y validez, sino una referencia muy útil para comparar los procesos y explicaciones propuestas con valores de excesos

enantioméricos (ee) generados de manera natural y por procesos abióticos, así como contrastar la viabilidad de los escenarios planteados, tanto teórica como experimentalmente, sucediendo no sólo bajo condiciones particulares, sino generales y extensivas al espacio interestelar. Por lo tanto, los planteamientos propuestos para explicar los procesos que generen una ruptura espontánea de la simetría (RES), tienen un énfasis particular en considerar mezclas racémicas de aminoácidos, al mismo tiempo que un parámetro obligado de referencia para probar su validez al compararlos con los L-ee encontrados en estos *α*-aminoácidos meteoríticos.

Este problema del origen de la quiralidad biológica puede remitirse, a su vez, a los procesos de RES que pueden sacar de su equilibrio a un sistema de manera abrupta, confiriéndole una inercia que le permite ganar cierto orden y, si el sistema es capaz de organizarse por sí mismo (autoorganizarse), soportar el desarrollo de una dinámica fuera del equilibrio que sea capaz de contrarrestar la tendencia a regresar al equilibrio y perder así el orden ganado por esta RES. De acuerdo con el principio de asimetría enunciado por Curie (1894), en el cuál se lee que *“cuando ciertas causas producen ciertos efectos, los elementos de simetría de las causas deberán ser encontradas en los efectos producidos. Cuando ciertos efectos revelan una cierta asimetría, esta asimetría deberá ser encontrada en las causas que les dan origen”*, los procesos, o proceso, que pudieron generar esta RES sobre los aminoácidos meteoríticos son, en sí mismos, asimétricos.

Considerando que es necesaria una fuente de asimetría actuando sobre una mezcla racémica de moléculas quirales, los experimentos reportados en la bibliografía han demostrado que la luz polarizada circularmente puede generar RES con alta pureza óptica: Los trabajos pioneros de Kuhn y Braun (1929) y Balavoine *et al.* (1974), quienes obtuvieron altos valores de ee a partir de mezclas racémicas de moléculas orgánicas, al someterlas a irradiación con luz polarizada circularmente (LPC), la cuál es un tipo de luz asimétrica, han dado paso a una intensa investigación que ha desembocado en la idea actualmente más explorada de que la fuente de asimetría capaz de provocar una RES sobre mezclas racémicas de aminoácidos en el medio interestelar es la LPC proveniente de una estrella de neutrones (Bonner y Rubenstein, 1987).

Lo anterior se encuentra basado en el hecho de que los enantiómeros de una molécula quiral, teniendo las mismas propiedades físicas y químicas generales (como punto de fusión, de ebullición, peso molecular, estructura química, etc.), exhiben comportamientos distintos cuando se analizan en interacción con un medio u otra molécula asimétricos y, principalmente, dentro de los sistemas biológicos. Cuando una mezcla racémica de una molécula quiral es irradiada con LPC izquierda o derecha, es decir, de una quiralidad definida, los enantiómeros de cada quiralidad establecen respuestas distintas ante este estímulo asimétrico. Si la longitud de onda empleada es la adecuada como para permitir que sea absorbida por la molécula quiral, cada enantiómero presentará diferencias en la absorbancia uno con respecto del otro, absorbiendo más o menos LPC respectivamente. Esta anisotropía del sistema tiene como consecuencia que la irradiación con un tipo de LPC sobre la mezcla racémica provocará ee hacia una quiralidad, y la irradiación con el tipo opuesto de LPC sobre la misma mezcla racémica provocará ee hacia la quiralidad contraria; ya sea porque los enantiómeros son degradados al absorber la LPC y uno lo hace más

fácilmente que el otro, o porque este tipo de luz asimétrica suministra la energía suficiente para provocar el cambio de la configuración quiral de un enantiómero al de su antípoda. De aquí resulta sencillo comprender que una mezcla racémica de algún aminoácido quiral, al ser irradiada con LPC de una quiralidad específica y con una longitud de onda adecuada, puede romper su simetría a favor de la quiralidad levógira y al irradiarla con LPC con una quiralidad opuesta a la anteriormente considerada, la rompa a favor del enantiómero dextrógiro. Sin embargo, esto no significa que todos los aminoácidos se comporten de forma similar: dependiendo del tipo de aminoácido quiral que se use para conformar la mezcla racémica, la irradiación con LPC izquierda, por ejemplo, puede generar excesos enantioméricos a favor de la serie quiral L o D, y lo mismo sucede con la LPC derecha (Jorissen y Cerf, 2002; Vandenbussche *et al.*, 2011). Además, dependiendo de la longitud de onda usada, también pueden generarse excesos enantioméricos L o D; esto debido a que la absorción de LPC provoca la excitación de electrones en las cadenas laterales del aminoácido y la variación en longitudes de onda provoca variaciones en la absorción y en el aporte de energía a la molécula, pudiendo reducir la absorción de un enantiómero y aumentando la de su antípoda.

En este sentido, cuando son irradiadas mezclas racémicas de un sólo tipo de aminoácido, pueden obtenerse L-ee usando una quiralidad y una λ de LPC adecuadas. Por el contrario, al someter una mezcla de varios tipos de aminoácidos, cada uno en proporciones racémicas y, por lo tanto, definiendo una mezcla global racémica, la RES provocada por dicha fuente de asimetría no presenta el mismo sentido quiral, favoreciendo en algunos aa al enantiómero L y en otros al enantiómero D, con valores de absorbancia distintos tanto en magnitud como en signo. Lo anterior ha sido definido por Biot y Fresnel (Patiño, 1990), dentro de la técnica denominada como Dicroísmo Circular, la cuál se basa en el fenómeno de la diferencia de absorbancias por parte de una mezcla racémica, al ser irradiada ya sea con LPC derecha, o con LPC izquierda: si ambas absorbancias son iguales, el dicroísmo circular da valores iguales a cero, lo que significa que ambos enantiómeros absorben igualmente la LPC derecha o izquierda, por lo que al ser irradiados con una cualquiera, la respuesta de ambos enantiómeros es igual, por lo que no se genera algún exceso enantiomérico en particular; por el contrario, si existen diferencias en las absorciones para cada quiralidad de LPC, los valores del dicroísmo circular darán valores distintos de cero, siendo negativos cuando la absorbancia por parte del enantiómero L es mayor (la absorbancia de LPC derecha es favorecida), y positivos cuando lo es para el enantiómero D (se absorbe más la LPC izquierda), debido a que el cálculo del dicroísmo circular se da en términos de $\Delta\epsilon = \epsilon_L - \epsilon_D$, donde ϵ_L y ϵ_D son los coeficientes de extinción molar para la LPC izquierda y derecha, respectivamente. Lo mismo sucede si se prueba con otras longitudes de onda a la vez. Entonces, se puede deducir que cuando se irradia una mezcla racémica de varios tipos de aminoácidos en proporciones también racémicas, pueden existir diferencias en los valores del dicroísmo circular (en las bandas de absorción), no sólo en cuanto a la magnitud, sino también en cuanto a signo, sumándose algebraicamente y reduciendo drásticamente el exceso enantiomérico generado por la mezcla en su conjunto o, incluso, pudiendo mantenerla racémica a pesar de que existan ee de manera individual para cada tipo de aa en la mezcla global.

La deducción anterior es confirmada por trabajos (Jorissen y Cerf, 2002; Vandenbussche *et*

al., 2011), que demuestran la existencia de signos contrarios en los valores del dicroísmo circular para distintos tipos de aminoácidos, al irradiarlos con LPC de la misma quiralidad y longitud de onda. El mismo fenómeno se observa si en lugar de una λ específica, es usado un intervalo o espectro de LPC amplio: un mismo aminoácido puede dar paso a valores con signos opuestos dentro de un mismo espectro de irradiación, disminuyendo drásticamente el ee que puede generar, o sumando cero dentro del espectro total al cual absorbe, según lo señala Mason (1997), aludiendo a la regla de la “suma cero de Kuhn-Condon”.

Este fenómeno descrito por el DC, plantea un problema contradictorio en el contexto de la RES provocada por la LPC en mezclas racémicas de aminoácidos, dentro de un contexto prebiótico, pues como se ha mencionado ya, un parámetro de comparación para las teorías propuestas para explicar el origen de la quiralidad biológica son los L-ee observados para los aa de meteoritos. Esto debido a que difícilmente en el medio interestelar (MIE), los meteoritos están sujetos a un intervalo específico de LPC que permita a sus α -metil aminoácidos presentar valores del dicroísmo circular del mismo signo en las bandas de absorción.

Los resultados anteriormente descritos plantean la distinción necesaria entre el conjunto de aminoácidos estándar (los 20 aminoácidos comúnmente encontrados en los sistemas vivos), y el conjunto biogénico de aminoácidos, que es aquel donde la mezcla racémica de ellos, dentro de un intervalo de irradiación con LPC, presenta valores de DC suficientemente alejados del cero, de tal modo que la mezcla global de este conjunto biogénico de aminoácidos es capaz de romper su simetría quiral a favor de uno de los enantiómeros. Dado que la presencia de aminoácidos con valores del DC con signo opuesto provoca una disminución, o incluso anulan los excesos enantioméricos que puedan generarse dentro de una mezcla, este conjunto biogénico de aminoácidos esta compuesto solamente por aminoácidos que presentan el mismo signo en sus bandas de absorción del DC, dentro del mismo intervalo de irradiación con LPC de una quiralidad dada. En este contexto, parece claro que el conjunto estándar de aminoácidos no fue el mismo que el conjunto biogénico, pues por ejemplo, el triptófano y la prolina presentan valores del dicroísmo circular muy distintos y opuestos al de los demás aminoácidos alifáticos (Cerf y Jorissen, 2000).

Este problema nos ha permitido abordar en esta tesis el fenómeno de la RES en aa de meteoritos desde una perspectiva que no involucra directamente la LPC, pues existen procesos alternativos que pueden explicar la RES observada, como el caso de la absorción enantioselectiva sobre superficies quirales. Estos escenarios principalmente han sido considerados tomando en cuenta superficies minerales, obteniendo resultados experimentales que demuestran la capacidad de minerales como el cuarzo o la caolita para formar agregados quirales, pudiendo inducir la absorción e incluso la síntesis o la degradación asimétrica de moléculas orgánicas quirales (Hazen y Sholl, 2003), debido a la capacidad catalítica presente en los minerales. Sin embargo, para que estas superficies minerales quirales rompan su simetría a favor de una quiralidad y, por lo tanto, induzcan una RES sobre las moléculas orgánicas a las que afectan asimétricamente, es necesario considerar ambientes muy particulares, así como temperaturas determinadas y altas concentraciones de las moléculas del mineral para provocar la formación de cristales. Esta interacción asimétrica entre un sustrato quiral y moléculas orgánicas también quirales tiene un respaldo experimental, aunque no directo considerando a los nanotubos de carbono, pero

plantea la necesidad de que el ambiente prebiótico y, más en particular, las superficies de meteoritos, reúnan condiciones específicas para causar la nucleación asimétrica de minerales. No obstante, y como se verá durante el desarrollo de la presente tesis, puede considerarse un sustrato asimétrico orgánico, y no mineral, formado en las regiones circumstelares bajo la influencia de fuertes campos magnéticos y de LPC asimétricos, como potencialmente pueden ser formados los nanotubos quirales de carbono, dando una inicial RES en éstos que, al adherirse a las superficies de meteoritos condritas carbonáceas, puede provocar la absorción enantioselectiva de los L-aminoácidos y provocar una RES en estas moléculas quirales.

De este modo, en la presente tesis se considera este proceso de interacción heterogénea entre una superficie asimétrica quiral y una mezcla racémica de aminoácidos meteoríticos, como un escenario probable para dar paso al L-ee observado en estas moléculas.

Conceptos

Quiralidad

A las geometrías logradas según se ordenan los grupos de átomos (ligandos) al rededor de uno o más centros de unión (átomos centrales) se les denomina estereoisómeros, los cuáles consisten en compuestos que son creados por el mismo tipo y número de átomos enlazados juntos en la misma secuencia, pero con diferente arreglo espacial alrededor del átomo central. Dada esta posibilidad en los distintos arreglos espaciales que una molécula puede adoptar, son reconocidos dos grandes grupos de estereoisómeros: los isómeros geométricos, y los isómeros ópticos (Chang, 2005).

Los isómeros geométricos son aquellos estereoisómeros que no pueden ser interconvertidos unos en otros sin romper un enlace químico de la molécula (figura 1a). Cada estereoisómero de este tipo es generado en pares (*cis* y *trans*), según dos átomos particulares (o grupos de átomos) se encuentran adyacentes uno a otro (*cis*) o se encuentran en lados opuestos de la estructura química (*trans*). Por su parte, los isómeros ópticos son aquellos pares de estereoisómeros que no son superponibles entre sí en el plano, debido a que cada uno es una imagen especular del otro (figura 1b), y son éstos los que en este trabajo presentan capital importancia.

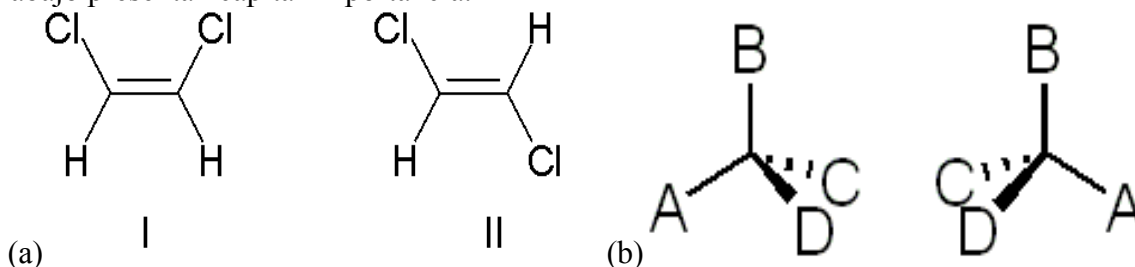


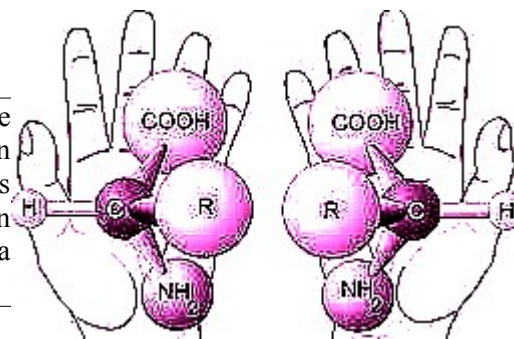
Figura 1.- Estereoisómeros. Se presentan los dos grandes tipos de estereoisomerismo: en (a) se presenta el estereoisomerismo geométrico del 1, 2-Dicloroetano con su par *cis* (I) y *trans* (II); en (b) se presenta el estereoisomerismo óptico para una molécula cualquiera, con un átomo de carbono asimétrico y cuatro sustituyentes distintos entre sí (A, B, C, D). Puede notarse que en (b), aunque entre ambas moléculas, dos de sus sustituyentes pueden hacerse coincidir (B y D, por ejemplo), los otros dos no (A y C).

Los isómeros ópticos son especies moleculares que presentan propiedades químicas y físicas idénticas (puntos de fusión, ebullición, momento dipolo y reactividad química), difiriendo únicamente en sus interacciones si son colocados en un medio asimétrico (como la luz polarizada circularmente), donde es sabido que las velocidades de reacción varían dependiendo de la quiralidad del medio (Chang, 2005). Además, si este tipo de estereoisómeros son colocados en un contexto biológico, el empleo de una u otra simetría no es indistinto, y tiene repercusiones importantes.

La existencia de los pares de isómeros ópticos son análogos a la relación existente entre las manos (izquierda y derecha) y cada isómero: si uno coloca una mano frente a un espejo, la imagen reflejada en él resulta ser la misma que la presentada en la mano opuesta a la que se reflejó, por lo que se dice que ésta es la imagen en el espejo (o especular) de la otra, y viceversa. De este modo, las manos resultan ser imágenes especulares entre sí; y si uno coloca ambas manos con las palmas orientadas a una misma dirección (por ejemplo, hacia abajo), definiendo así un plano de simetría, no pueden hacerse coincidir una sobre la otra, a menos que se rompa dicho plano y una sea girada sobre él, por lo que resultan ser no superponibles.

De este modo se deriva la nomenclatura de este tipo de estereoisómeros: si una molécula presenta uno o más centros sobre los cuáles puedan acomodarse ciertos ligandos (grupos de átomos), y resultan pares de isómeros ópticos que cumplen la propiedad descrita antes de ser no superponibles entre sí, se les denomina como moléculas quirales, por la palabra griega *χειρ* (*quirós*) que significa mano (figura 2). Mientras tanto, los isómeros ópticos que sí pueden superponerse con sus imágenes especulares se les denomina aquirales. Por extensión, a cualquier cuerpo geométrico que no es superponible con su imagen en el espejo se le denomina quiral, y cualquiera que sí lo pueda hacer, se le llama aquiral.

Figura 2.- Quiralidad. Se muestra la representación de los isómeros izquierdo (L) y derecho (D) de un aminoácido quiral, y su analogía con las manos humanas. Nótese que si ambas moléculas son mantenidas sobre el plano, no pueden superponerse para hacerse coincidir exactamente.



Kelvin, en 1893, definió el concepto de quiralidad diciendo: "*llamo a cualquier figura geométrica, o grupo de puntos, quirales, y digo que tienen quiralidad, si su imagen en el plano de un espejo, idealmente realizada, no puede hacerse coincidir consigo misma*" (citado por Cronin y Reisse, 2005).

Una molécula, o mezcla de moléculas, quirales se dice que es ópticamente activa si al interactuar con la luz polarizada linealmente (LPL), tiene la habilidad de rotar el plano de polarización en un sentido cuando ésta pasa a través de ella. Esta habilidad de rotar el plano de polarización de la LPL permite dividir cada isómero óptico en levógiro (L) si lo hace

hacia la izquierda, y dextrógiro (D) si lo hace hacia la derecha (figura 3). Cada isómero L y D es llamado enantiómero y desvían el plano de polarización en la misma magnitud hacia sus respectivas direcciones cada uno.

Si en una mezcla de enantiómeros se encuentran en la misma proporción los dextrógiros y los levógiros, cada molécula desvía el plano de polarización de la LPL con la misma magnitud pero en sentidos opuestos, dando como resultado que la rotación neta sea igual a cero. Este tipo de mezclas donde ambos enantiómeros se encuentran en una concentración equimolar uno con respecto del otro, se les denomina como mezclas racémicas (Chang, 2005).

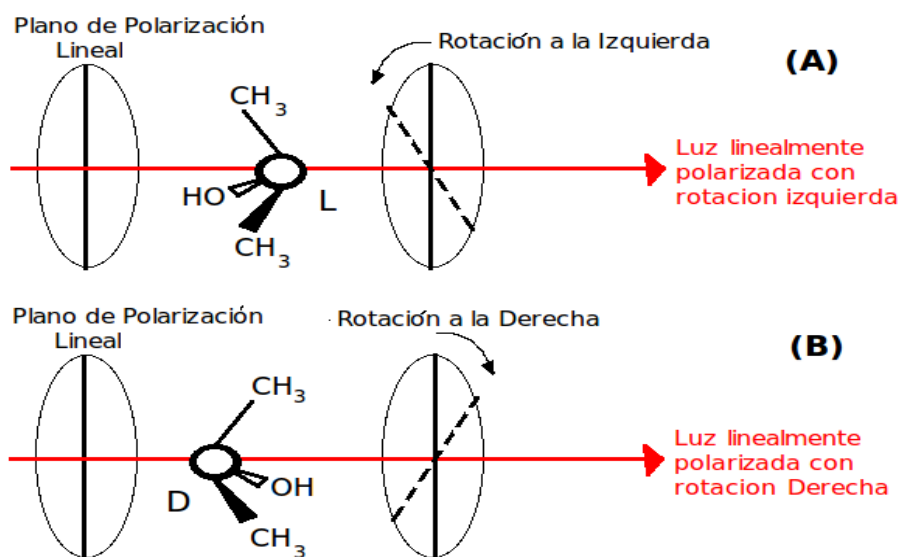


Figura 3.- Enantiómeros L y D. Se presentan las rotaciones relativas al plano de polarización de la luz linealmente polarizada, para los enantiómeros L (A) y D (B), de una molécula quiral.

Una mezcla racémica de moléculas quirales no es estática, y el concepto sirve para definir una mezcla de enantiómeros que varían activamente en sus proporciones L/D, dentro de un intervalo definido como su variación estándar, pero las oscilaciones de la mezcla en el tiempo neutralizan estas variaciones L/D, al darse para ambos enantiómeros de manera indistinta, y promediar una actividad óptica global (neta) igual a cero.

Por el contrario, cuando en una mezcla de moléculas quirales sólo se encuentra uno de los enantiómeros, esta mezcla recibe el nombre de mezcla homoquiral. Esto en el mismo sentido de la definición de Kelvin: "*dos manos derechas iguales y similares son homoquiralmente similares. Manos derechas e izquierdas iguales y similares son heteroquiralmente similares o aloquiralmente similares. A éstas se les llama enantiomórfos*" (citado por Cronin y Reisse, 2005). Una mezcla homoquiral, por lo tanto, presenta actividad óptica en una alta intensidad, debida a su alta pureza enantiomérica.

Cuando se quiere determinar la quiralidad de una molécula, basta con el uso de la LPL para identificar sus enantiómeros; sin embargo, cuando un objeto cualquiera quiere ser descrito en términos de su arreglo geométrico con respecto a su imagen en el espejo, existe un

criterio matemático dentro de la teoría de simetría de grupos por medio del cuál puede ser determinado si un objeto es quiral o aquiral: "*un objeto es aquiral si, y sólo si, éste posee un eje impropio de rotación del orden n* " (Cronin y Reisse, 2005). En este criterio, el orden n en los ejes de rotación, se refiere a los ejes que pueden ser trazados en un objeto para, al rotarlo sobre éste, se conserve la misma geometría; por ejemplo, un triángulo presenta un orden tres de simetría, y un cuadrado presenta un orden cuatro, mientras que un pentágono presenta un orden cinco de simetría.

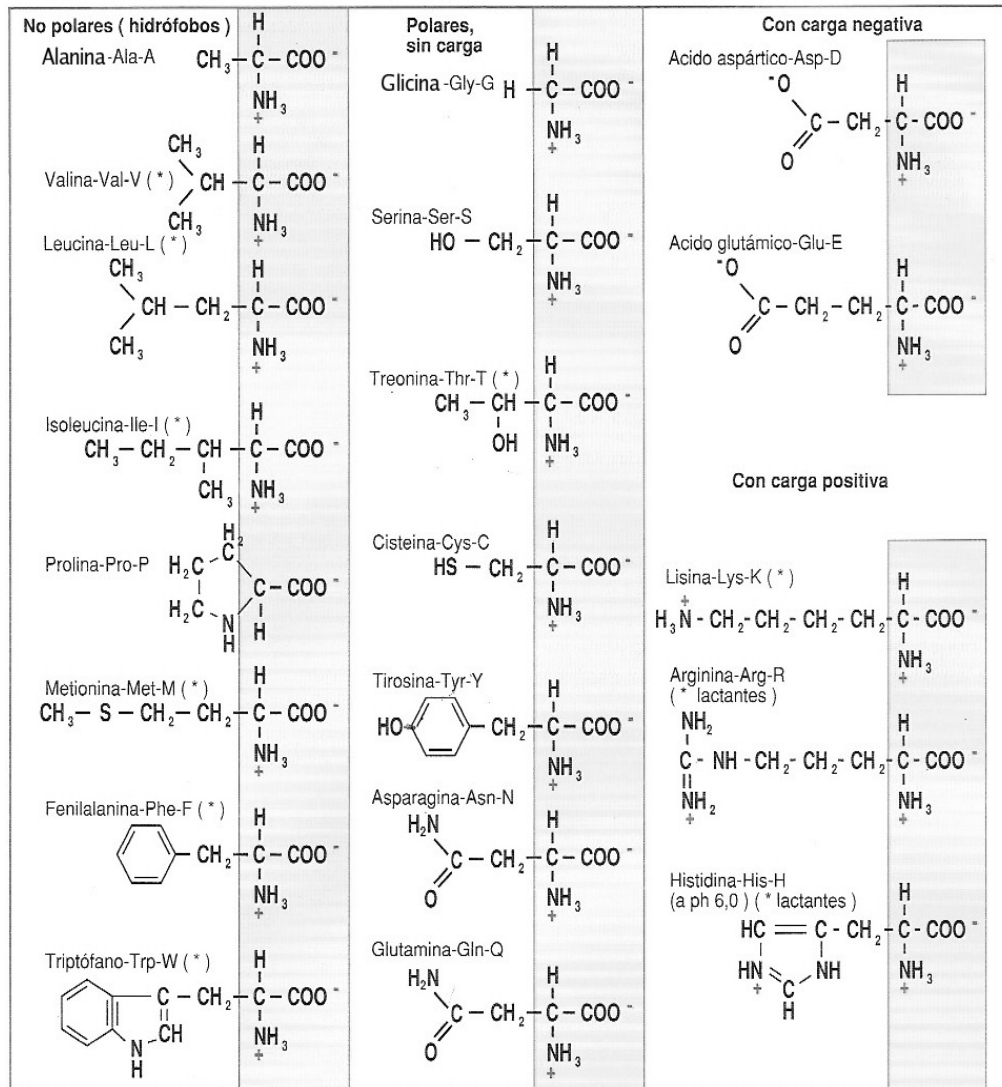
La identificación de los enantiómeros de una molécula quiral, según la nomenclatura presentada, depende de la medición del sentido de la desviación, con respecto al sentido de rotación de las manecillas del reloj, del plano de polarización de la LPL que provoca la mezcla de un enantiómero dado. Sin embargo, la IUPAC recomienda seguir el sistema descrito por Cahn-Ingold-Prelog, en donde la identificación de cada enantiómero se realiza sin necesidad de una medición de la desviación de la luz polarizada, sino que define de manera absoluta la configuración de cada centro asimétrico en una molécula y se les designa a cada uno como S o R (*sinister* o *rectus*), siendo equivalentes a los enantiómeros L y D, respectivamente, pues ambas palabras vienen del latín y significan izquierdo (la primera), y derecho (la segunda). La asignación S o R se da tomando como referencia un centro quiral (un átomo central en una molécula), y siguiendo los criterios definidos por Cahn-Ingold-Prelog, asignando prioridades a los diferentes átomos (o grupos de éstos), para establecer un sentido (nuevamente con referencia al sentido de rotación de las manecillas del reloj), con respecto al cuál se orientan al rededor del centro quiral.

En cuanto a las interacciones que una molécula quiral puede establecer, tenemos que una molécula aquiral, cuando interactúa con una molécula quiral, puede hacerse también quiral (Cronin y Reisse, 2005). Por su parte, y dejando por un momento de lado las posibles diferencias en la energía debidas a la violación de la paridad (que se tratarán más adelante), es sabido que los pares de enantiómeros presentan la misma energía interna y se caracterizan de otros pares enantioméricos al presentar la misma reactividad si el reactante con el que cada isómero óptico va a interactuar es aquiral. Por el contrario, cuando la molécula con la cuál cada enantiómero reacciona o interactúa es en sí misma también un enantiómero, la velocidad con la que cada uno lo hace es distinta: por cuestiones de su arreglo espacial, es más sencillo que dos enantiómeros de la misma quiralidad se acoplen para reaccionar o interactuar, que a que lo hagan dos enantiómeros de quiralidades opuestas, aún cuando estos sean enantiómeros de la misma molécula; caso contrario al tratarse de una complementación espacial por medio de interacciones electrostáticas, pues las moléculas de quiralidad opuesta pueden más fácilmente complementarse que aquellas de quiralidad idéntica. Es así que, si se tiene un par enantiomérico cualquiera de una molécula a, es decir D-a y L-a, y se ponen a reaccionar con un enantiómero cualquiera, digamos L, de una segunda molécula b (aunque puede ser la misma molécula a), se tiene que los pares en interacción (D-a/L-b) y (L-a/L-b) presentan diferentes tasas de reacción, diferentes propiedades y diferente energía interna; además, dado que cada par en interacción representa un complejo que puede ser disociado, o un estado de transición en la reacción, o una molécula estable; son formados así estereoisómeros, pues cada molécula formada presenta el mismo tipo y número de átomos enlazados en la misma secuencia; empero, estos no representan enantiómeros debido a las diferencias físicas y químicas entre ellos antes mencionadas. A este tipo de moléculas formadas por la reacción o interacción de

dos enantiómeros (o más) se les denomina diastereoisómeros, o diasterómeros (Cronin y Reisse, 2005).

Aminoácidos

Los aminoácidos son compuestos moleculares que reciben su nombre debido a que son derivados aminados de ácidos carboxílicos (Horton, *et al.* 2008), y en su estructura química contienen por lo menos un grupo amino ($-\text{NH}_2$) y por lo menos un grupo carboxilo ($-\text{COOH}$). Existen numerosas moléculas de este tipo, sin embargo, todos los sistemas biológicos emplean los mismos 20 aminoácidos como sus elementos constitutivos en la formación de moléculas de proteína (figura 4), razón por la cuál a estos veinte aminoácidos se les conoce como esenciales, estándar o comunes. Cabe hacer notar, sin embargo, que existen algunos organismos (como bacterias), que emplean uno o más aminoácidos poco usuales; pero estas variaciones no son drásticas ni frecuentes para modificar la generalidad del modelo de los 20 aa estándar.



↑**Figura 4.- Aminoácidos Estándar.** Se presenta el cuadro con los 20 aminoácidos estándar empleados por los organismos vivos actuales para constituir las proteínas. En la figura se presentan las formas ionizadas, eléctricamente neutras para cada aa (forma zwitteriónica), por tal motivo es que se observa al grupo -COO (cuya carga negativa se debe a la carencia de un H⁺), y al grupo NH₃⁺ (cuya carga positiva se debe al exceso de un H⁺). Nótese que en la región no sombreada se resalta la estructura básica de los aminoácidos, con su carbono quiral al centro, unido a cada cadena lateral (región sombreada), que le da sus propiedades a cada aminoácido. También es de resaltar que la glicina es el aminoácido más sencillo y es el único aquiral.

En los 20 aminoácidos estándar, tanto el grupo amino como el grupo carboxilo se encuentran unidos a un átomo de carbono central que es denominado α (carbono α), recibiendo así la denominación de α -aminoácidos (Chang, 2005). Al carbono α se unen dos grupos sustituyentes distintos: un átomo de hidrógeno (H), y una cadena lateral que le da identidad a cada aminoácido y define sus propiedades fisicoquímicas y de reactividad, denotada por la letra R.

De acuerdo con la IUPAC y la Unión Internacional de Bioquímica y Biología Molecular (IUBMB), la nomenclatura empleada para denotar de manera sistemática a los aminoácidos se basa en la numeración de los átomos de carbono, siendo el número uno el carbono del grupo carboxilo; de este modo, por ejemplo, el ácido carboxílico CH₃-CH₂-COOH (ácido propanoico) es el precursor del aminoácido CH₃-CH(NH₂)-COOH, por lo que su nombre sistemático es ácido 2-aminopropanoico, comúnmente llamado alanina; de donde se hace evidente que la cadena lateral (el grupo R) es -CH₃ (Horton *et al.*, 2008). Aquí es de resaltar que los aminoácidos se derivan de los ácidos carboxílicos que los preceden, los cuáles no han sido reportados con excesos enantioméricos sobre la superficie de meteoritos, como sí lo han sido los aminoácidos (Vandenbussche *et al.*, 2011)

De los 20 aminoácidos estándar, en 19 de ellos el carbono α es asimétrico (quiral), pues los cuatro grupos se unen a él son todos distintos. La glicina es el único aminoácido estándar no quiral (o aquiral), pues el grupo R es un átomo de hidrógeno, por lo que su carbono α se encuentra unido a dos sustituyentes idénticos (dos átomos de H, ver figura 2). Por su parte, la isoleucina y la treonina son los únicos dos aminoácidos estándar que tienen dos átomos de carbono quirales cada uno, por lo que pueden formar cuatro estereoisómeros diferentes, es decir, dos pares de enantiómeros cada uno (Horton *et al.*, 2008). Dado que la estructura general de los aminoácidos es la misma, las cadenas laterales son las que les confieren propiedades físicas particulares a cada uno, y estas propiedades presentes en las cadenas laterales son de gran importancia cuando los aminoácidos se encuentran unidos formando cadenas polipeptídicas; pues como se verá más adelante, su organización a lo largo de una secuencia puede conferirle al polímero la capacidad de almacenar información estructural. Estos polímeros son formados al unirse aminoácidos por medio de un enlace peptídico entre los grupos -NH₂ y -COOH, motivo por el cual son llamados péptidos, y las proteínas, al estar formadas por una o varias cadenas peptídicas, también suelen ser denominadas como péptidos.

A pesar de que comúnmente se habla de 20 aminoácidos implicados en la biosíntesis de proteínas, existen más de 200 diferentes de ellos en los organismos vivos (Horton *et al.*, 2008). Todos los sistemas vivos presentan varios L-aminoácidos que son los precursores de los aminoácidos estándar o que son intermediarios de otras rutas bioquímicas. A pesar de que se ha reportado la presencia de aminoácidos diestros en los sistemas biológicos (Fujii, 2002), es sabido que éstos son producto de síntesis a partir de L-aminoácidos precursores, o son metabolitos secundarios; lo que no modifica la afirmación de que todos los aminoácidos quirales que participan en la síntesis de proteínas en los sistemas biológicos son levógiros.

A este respecto, Horton *et al.* (2008), hace referencia a que "el hecho de que todos los organismos vivos empleen los mismos aminoácidos estándar en la síntesis de sus proteínas es prueba de que todas las especies de la Tierra descienden de un ancestro común", y además precisa: "No se sabe cómo o por qué las formas primitivas de vida seleccionaron los aminoácidos L en la mezcla hipotética de enantiómeros presente cuando apareció por primera vez la vida". Esta última afirmación tiene implícita la idea de que la vida apareció previamente a la condición homoquiral de sus elementos moleculares, y es en este sentido que la presente tesis intenta aportar argumentos para considerar lo contrario: que la condición homoquiral es un requisito previo para el establecimiento de un sistema biogénico. Proponemos en este sentido que se requiere de un inicial exceso L-enantiomérico, que permita la autoorganización de la materia entre elementos de la misma quiralidad, para dar paso al establecimiento de interacciones en redes que tienden cada vez más a la condición homoquiral, capaces de sustentar la incipiente dinámica biológica. Siendo la vida no el resultado de un proceso solamente oportunista, sino el resultado de dinámicas y procesos de interacción en la materia, que convergen en los sistemas vivos.

Luz Polarizada Circularmente

La teoría ondulatoria desarrollada por Maxwell considera a la luz como una onda electromagnética (figura 5), que consiste en un campo magnético y un campo eléctrico que varían en el tiempo y que, a su vez, se generan uno al otro pues todo campo eléctrico variante genera un campo magnético y viceversa. Estos campos se orientan de manera perpendicular entre sí.

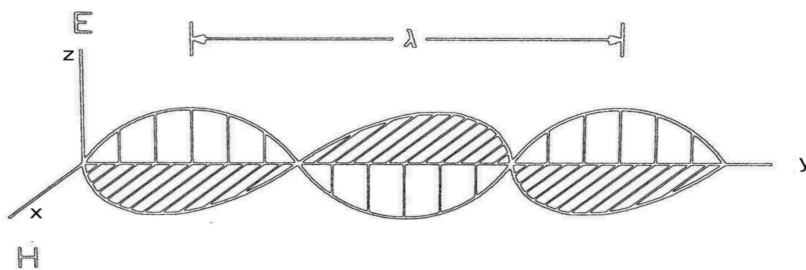


Figura 5.- Onda electromagnética. Se presenta el modelo de la luz como una onda. En la figura se observa la presencia de los campos eléctrico (E) y magnético (H), viajando de manera perpendicular uno con respecto al otro, con la misma dirección sobre el eje y . Las líneas entre el eje y y los campos son guías para hacer notar la perpendicularidad entre los campos, así como su coincidencia en fases. A la distancia entre puntos equivalentes dentro de cada onda (generalmente considerada la distancia entre puntos máximos de uno de los campos), se le denomina longitud de onda (λ). *Modificado de Kliger et al., 1990.*

respecto del otro, con la misma dirección sobre el eje y . Las líneas entre el eje y y los campos son guías para hacer notar la perpendicularidad entre los campos, así como su coincidencia en fases. A la distancia entre puntos equivalentes dentro de cada onda (generalmente considerada la distancia entre puntos máximos de uno de los campos), se le denomina longitud de onda (λ). *Modificado de Kliger et al., 1990.*

La luz se propaga de manera lineal sobre un eje, en un espacio de tres dimensiones que puede hacerse corresponder con un espacio de coordenadas eucladiano (x, y, z); desplazándose en dirección del eje y (pudiendo adoptar los sentidos +y o -y), y situándose el campo eléctrico en el plano (y, z) y el magnético en el plano (x, y); siendo arbitrarias estas asignaciones y pudiendo estar en cualquier plano definido para cada uno de los campos, siempre y cuando se mantengan perpendicularmente orientados uno con respecto del otro. Si definimos E como el campo eléctrico, orientado en el plano (y, z), cuya amplitud máxima definimos como E_z^0 , y H como el campo magnético, orientado en el plano (x, y), cuya amplitud máxima denotamos por H_x^0 ; entonces podemos definir la dirección de cada campo por medio de las expresiones definidas por Kliger *et al.* (1990):

$$E = E_z^0 \text{ sen}[\omega t - 2\pi s/\lambda + \phi_0] \quad ; \quad H = H_x^0 \text{ sen}[\omega t - 2\pi s/\lambda + \phi_0]$$

Lo anterior es útil para observar que en una onda de luz no polarizada, ambos campos pueden ser iguales en magnitud, $|E| = |H|$, si sus valores de amplitud máxima son iguales ($E_z^0 = H_x^0$), propagándose con la misma longitud de onda λ y la misma constante específica de la fase absoluta ϕ_0 , y se evidencia que en una onda de luz no polarizada ambos campos, aunque perpendiculares uno con respecto al otro, se propagan con la misma dirección s, la misma frecuencia ω y la misma amplitud.

Las descripciones anteriores sirven como referencia para comparar la luz no polarizada con alguna forma polarizada. Por ejemplo, la luz polarizada linealmente: este tipo de polarización se consigue cuando la luz no polarizada, que se encuentra compuesta por ondas electromagnéticas que vibran en todos los ángulos del espacio tridimensional desplazándose sobre el mismo eje, se encuentra con un medio polarizador, donde solamente las ondas que se desplazan con un ángulo determinado consiguen atravesar el medio, mientras el resto son absorbidas o reflejadas. La LPL suele describirse como:

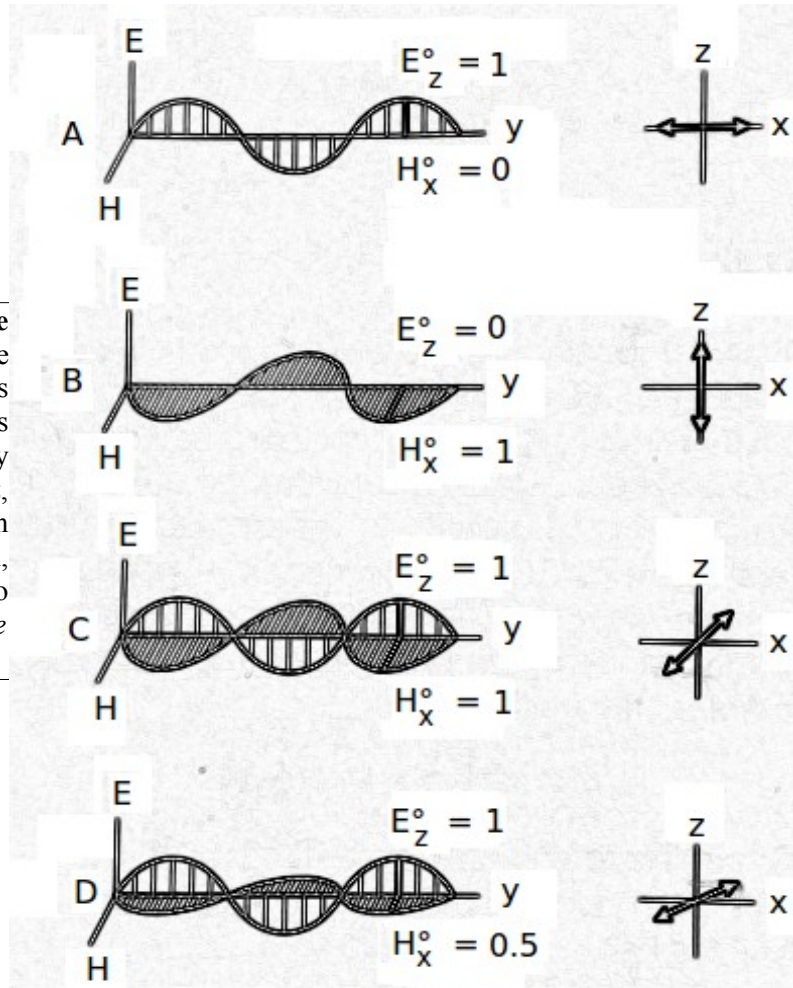
$$E_z = E_z^0 \text{ sen}[\omega t - 2\pi s/\lambda + f_0] \mathbf{j}$$

En esta ecuación se representa una onda de luz polarizada linealmente con el plano de polarización sobre el plano (x, y), que sólo permite al plano (y, z), correspondiente al campo eléctrico (E) en nuestro ejemplo, propagarse. Esta descripción es la misma que la realizada para la luz no polarizada, a diferencia de un parámetro denotado por \mathbf{j} , que es el vector unitario, en este caso $\mathbf{j} = (0, 0, 1)$, y limita, como ya se ha dicho, la amplitud de la luz (linealmente polarizada), a únicamente valores distintos de cero en el eje z. Suele utilizarse, en los libros, la descripción para el campo eléctrico de la luz polarizada linealmente, debido a que la interacción de la luz con las moléculas involucra redistribución de cargas, y este campo eléctrico presenta efectos que, incluso, incluyen a los provocados por el campo magnético (Kliger *et al.*, 1990).

En la descripción matemática anterior se representa uno de los casos donde los componentes x y z de la luz linealmente polarizada, viajando sobre el eje y, tienen valores distintos pero presentan fases iguales. Aquí se presenta el caso cuando $x = 0$ para cualquier valor que se tome en la propagación de la onda (es decir, la amplitud máxima de la onda en

el plano (x, y) es igual a cero), provocando que sólo el campo que se encuentra sobre el plano (y, z) se propague con una amplitud máxima distinta de cero, lo que da origen a la forma tradicional de representar la luz linealmente polarizada. Sin embargo, puede presentarse el caso cuando del plano de polarización no corta de manera perpendicular a ninguno de los campos eléctrico ni magnético, como es el caso de la polarización a 30° con respecto al eje x (figura 6), donde pueden propagarse ambos campos con amplitudes mayores que cero, pero diferentes entre ellos, (por ejemplo, tomando valores máximos de $E = 1$ y de $H = 0.5$; figura 6D).

Figura 6.- Grados de polarización lineal. Se observan las diferentes amplitudes máximas adoptadas por los campos eléctrico y magnético de una onda de luz, dependiendo de la orientación del plano de polarización, representado en un plano cartesiano. *Modificado de Kliger et al., 1990.*



Una manera geométrica de identificar los tipos de polarización de la luz es al descomponer la onda en dos componentes vectoriales perpendiculares uno con respecto del otro, y que representan los campos eléctrico y magnético propagándose perpendiculares al eje de propagación. Si se orientan de modo que se puede observar un plano generado por estos dos componentes vectoriales, pueden sumarse en cada momento específico durante todo el recorrido de la propagación de la onda (sobre el eje y), donde la amplitud de cada campo va variando y el vector resultante dibuja una figura geométrica, si y sólo si se considera el punto en el plano que une ese vector con el origen. Si esta figura es una línea recta, la polarización de la luz es lineal.

Por su parte, la luz polarizada circularmente (LPC) representa un caso en el cual los dos componentes del campo electromagnético presentan magnitudes E^0 idénticas pero están con una diferencia de fase de 90° . Si se representa esta polarización de la manera geométrica descrita anteriormente, tenemos que el vector resultante dibuja una circunferencia conforme la onda circularmente polarizada se desplaza. De este modo, la descripción matemática para la luz polarizada circularmente, en el campo eléctrico, hacia la derecha, está tomada aquí nuevamente por la expresión definida por Kligler *et al.* (1990):

$$\begin{aligned} E_{pcd} &= E^0 [\text{sen}(\omega\tau - ks + \phi_0)\mathbf{j} + \text{sen}(\omega\tau - ks + \phi_0 + \pi/2)\mathbf{l}] \\ &= E^0 [\text{sen}(\omega\tau - ks + \phi_0)\mathbf{j} + \text{cos}(\omega\tau - ks + \phi_0)\mathbf{l}] \end{aligned}$$

Y para la luz polarizada circularmente hacia la izquierda:

$$E_{pci} = E^0 [\text{sen}(\omega\tau - ks + \phi_0)\mathbf{j} - \text{cos}(\omega\tau - ks + \phi_0)\mathbf{l}]$$

Donde el campo eléctrico E se propaga sobre el eje y , y donde \mathbf{j} y \mathbf{l} son los vectores unitarios $(0, 0, 1)$ y $(1, 0, 0)$, respectivamente. De este modo, puede apreciarse que, dado que existe un desfase de 90° entre ambos campos en la luz polarizada circularmente, el vector que se genera conforme la onda se propaga sobre el eje y describe el radio de una circunferencia (figura 7), definiendo puntos sobre ésta que van siendo recorridos en sentido de las manecillas del reloj (polarización circular hacia la derecha), o en sentido contrario de las manecillas del reloj (polarización circular hacia la izquierda); que si es vista de manera longitudinal esta trayectoria, se describe una espiral (a la derecha o a la izquierda, según el caso).

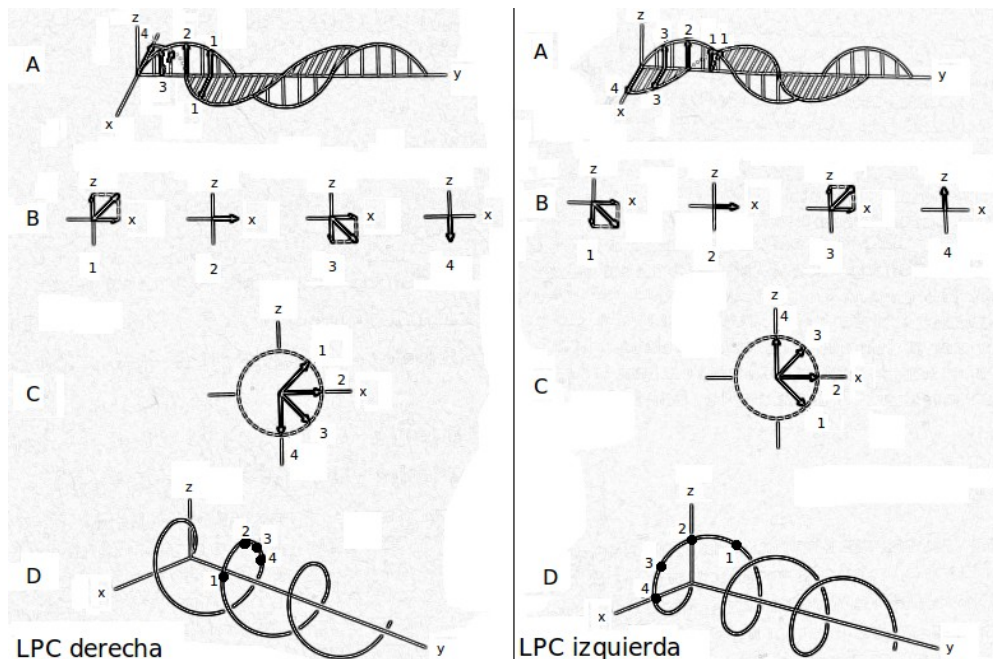


Figura 7.- Luz polarizada circularmente. Se presenta la polarización de la luz a la derecha y a la izquierda, como se menciona en el dibujo, y se detalla en el texto. *Modificado de Kigler et al., 1990.*

El vector que se describe con las expresiones anteriores representa el campo eléctrico de la luz, con una magnitud constante E^0 , pero con una dirección que cambia con respecto al tiempo, en un mapeo que describe el movimiento circular antes mencionado. Este tipo de luz (polarizada circularmente), puede ser vista como una luz formada por componentes de la luz polarizada linealmente que están fuera de fase uno con respecto del otro; y por su lado, la luz polarizada linealmente puede ser vista como una onda compuesta por cantidades iguales de los componentes derecho e izquierdo de la luz polarizada circularmente (Kliger *et al.*, 1990), por lo que, en el sentido del presente trabajo, resulta una composición racémica de la luz (Cronin y Reisse, 2005), y puede ser representado matemáticamente al sumar las dos descripciones anteriores para la LPC izquierda (Epci) y derecha (Epcd) donde, al ser iguales los términos de la segunda parte de cada descripción, pero estar precedidas por signos opuestos, sólo los valores sobre el plano (y, z) tendrán amplitudes máximas distintas de cero, quedando la descripción matemática hecha para la LPL. De este modo, y recordando el principio de asimetría de Curie, tenemos que la polarización circular de la luz, y no la lineal, representa un componente asimétrico que, actuando sobre un sistema racémico, puede generar una asimetría en él, si los elementos de éste son capaces de establecer respuestas ante la acción de la LPC.

Para fines de notación, la LPC es denotada con (+)LPC para la polarización hacia la derecha (o dextrógira), y (-)LPC para la polarización hacia la izquierda (o levógira), debido a que el vector resultante que se genera al sumar los vectores de los campos E y H de la LPC viajando sobre el eje y, describe una circunferencia que va en sentido de las manecillas del reloj para la (+)LPC, y que lo hace en sentido opuesto a las manecillas para la (-)LPC.

Dicroísmo Circular

El fenómeno del DC hace referencia a la absorción desigual de la LPC izquierda y derecha por parte de un medio quiral (pudiendo ser una molécula), al ser exhibida por medio de bandas de absorción de la luz, al atravesar el medio ópticamente activo (Charney, 1979). Se da debido a que la LPC que pasa por el medio quiral, tiene diferencia de velocidades entre sus polarizaciones izquierda y derecha, que depende de la longitud de onda empleada, y es absorbida

Es un fenómeno descrito por Haidinger y luego por Dove usando amatista de cuarzo en 1895, aunque Biot en 1815, ya había descubierto y reportado reportado que existe una absorción desigual de rayos de luz no polarizados y con algún tipo de polarización, por cristales doblemente refractantes, empleando tourmalina para realizar estas observaciones (Lowry, 1964). Este fenómeno es el reflejo de la absorción anisotrópica de la LPC por muestras quirales, y tiene lugar sólo en las regiones espectrales en las cuales las bandas de absorción se presentan (Eliel *et al.*, 2001); fuera de este espectro de absorción, el DC no se tiene algún efecto.

De este modo, podemos notar que si el DC es determinado mediante la diferencia de las absorbancias de +LPC y -LPC, se puede medir como $\Delta A = A_L - A_R$, donde A_L y A_R son los valores de absorbancias para la LPC - y +, respectivamente. Por su parte, si las concentraciones molares de los enantiómeros de la sustancia quiral son conocidas, Eliel *et*

al. (2001) describen que dado que $\Delta A = \Delta \epsilon c l$, donde c es la concentración en moles por litro y l es el diámetro del haz de irradiación de la sustancia, se puede escribir $\epsilon_L - \epsilon_D = \Delta \epsilon$, donde ϵ representa los coeficientes de absorción molar y el signo de $\Delta \epsilon$ define el signo para la banda de absorción del DC a la λ que se mida.

Con esta primera definición, podemos remarcar el hecho de que el DC no presenta un valor único para cada molécula quiral, sino una serie de valores según la longitud de onda que se emplee. Además, puede notarse que estos diferentes valores para una misma molécula quiral, no son todos del mismo signo, pues al ser preferencialmente absorbida la LPC de una determinada λ por uno de los enantiómeros, al cambiar ésta, puede verse favorecida la absorción por parte del enantiómero opuesto. Lo anterior es debido a que el campo eléctrico de la LPC causa un desplazamiento lineal de cargas cuando interacciona con una molécula, originando un dipolo eléctrico; mientras que su campo magnético provoca el reacomodo de cargas, induciendo un dipolo magnético. Ambos movimientos en combinación, al interior del enantiómero, provocan la excitación de un electrón en un movimiento helicoidal que incluye los movimientos de traslación y de rotación en él (Charney, 1979). Esta excitación puede darse en el enantiómero opuesto al cambiar de λ , pudiendo ser o no, de la misma magnitud, por lo que Kuhn estableció experimentalmente que dentro de un intervalo completo de irradiación con LPC, la alternancia de bandas de absorción con signos opuestos dentro del DC para una sustancia quiral, suman cero, manteniéndose la actividad óptica nula (citado por Mason, 1988).

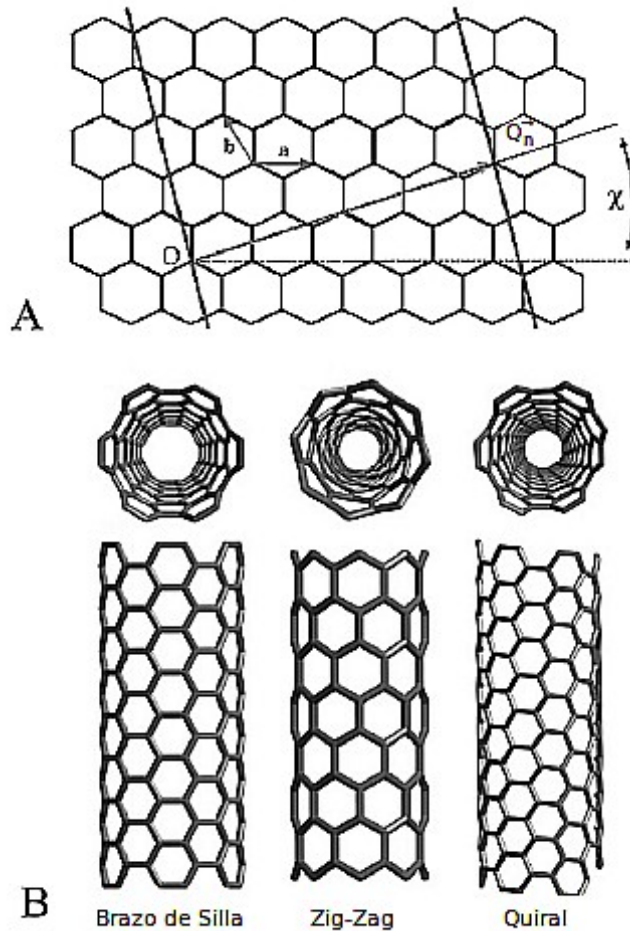
Este hecho es de relevantes consecuencias, pues como se ha ya comenzado a sugerir y como se discute a continuación, la búsqueda de un conjunto de aminoácidos que presenten valores del DC del mismo signo, dentro de un intervalo de irradiación específico que pueda potencialmente estar presente en el MIE, no ha podido ser definido. Por lo que el problema de la cancelación de la actividad óptica dentro de una misma molécula quiral, así como la cancelación entre aminoácidos distintos con valores de DC de signo opuesto, ha impedido que la LPC sea considerada, sin lugar a dudas, como la fuente de asimetría necesaria y suficiente para dar paso a los excesos L-enantioméricos en los α -aminoácidos meteoríticos. Problema que en esta tesis abordamos por medio de nuestra propuesta de la presencia de un sustrato quiral que pueda servir como esta fuente de asimetría en lugar de la LPC.

Nanotubos Quirales de Carbono

Si bien el carbono por sí sólo no se trata de una molécula quiral, se ha mencionado ya que la quiralidad no se limita a los elementos que constituyen una estructura, sino que pueden surgir formas quirales a partir de elementos aquirales por procesos asimétricos actuando sobre la estructura en formación. De este modo, los nanotubos de carbono son sistemas de agregación molecular de diámetro nanométrico pero que pueden alcanzar varios centímetros de longitud (figura 8), pudiendo incluso cubrir una impredecible proporción de longitud/diámetro que excede a los 10^7 cm (Tomárek *et al.*, 2008), pudiendo ser considerados como sistemas unidimensionales. Se forman de manera espontánea bajo condiciones específicas, como la sublimación del carbono ante altas temperaturas, tanto como nanotubos de pared sencilla como nanotubos multipared (o multicapa). Los nanotubos de carbono contiguos exhiben un alto grado de ordenamiento a escala atómica. Este hecho, además de su relación cercana con el grafito (una estructura laminar de hojas

de grafeno), hace a los nanotubos químicamente inertes. Se comportan como metales o como semiconductores dependiendo de su diámetro y estructura atómica y son excelentes conductores de calor (Tomárek *et al.*, 2008).

Figura 8.- Geometrías básicas de los nanotubos de carbono de pared sencilla a partir del enrollamiento del grafeno. En A), puede observarse una hoja de grafeno, sobre la cuál pueden ser dibujados los ejes de simetría al darse su enrollamiento, en la figura, el vector quiral está representado por Q_n . En B), se presentan las geometrías básicas de los nanotubos de carbono de pared sencilla. Es de hacer notar que la principal característica para diferenciar estas tres formas entre sí es gracias al arreglo de los hexágonos en sus extremos. *Modificado de Gao y Kong, 2004.*



Para su estudio, un nanotubo de carbono de pared sencilla puede ser visto como una hoja de grafeno enrollada formando un cilindro. Una hoja de grafeno es una forma alotrópica (una de las distintas estructuras químicas) del carbono que presenta un arreglo hexagonal en el plano, con los átomos de carbono ubicados en cada vértice (figura 8). Dependiendo del grado de enrollamiento y las condiciones periódicas del arreglo de los átomos sobre los bordes, pueden ser originados nanotubos de distintos diámetros y geometrías internas, que determinan las propiedades eléctricas y termodinámicas. De este modo, una primera diferencia en la formación de nanotubos es aquella que origina estos nanotubos de carbono de pared sencilla, o aquella que origina estructuras concéntricas, donde nanotubos de diferente diámetro se encuentran enrollados unos dentro de otros para formar nanotubos de pared múltiple.

Así mismo, las propiedades eléctricas de conductividad o semiconductividad de los nanotubos vienen dadas por relaciones fundamentalmente geométricas en función de su diámetro, su helicidad (quiralidad) y el número de capas de su composición. Las tres formas más comunes de nanotubos de carbono de pared sencilla están dadas por las

geometrías adoptadas a partir del grafeno en dos dimensiones y son llamadas de “brazo de silla”, que son los formados por el enrollamiento de la hoja de grafeno con una inclinación en el arreglo de los hexágonos de 30°. Los nanotubos en “zig-zag” presentan en los bordes del nanotubo un arreglo en forma de zig-zag. Y los nanotubos de carbono quirales, donde existe una cierta inclinación entre 0° y 30° en el arreglo de los hexágonos a lo largo del nanotubo, dada por un vector denominado vector quiral (figura 8). Para el caso, por ejemplo, de los nanotubos de carbono de brazo de silla y los de zig-zag, las disposiciones hexagonales en las partes extremas del tubo, son siempre paralelas al eje. Esta distribución, en función del diámetro, permite que dos tercios de los nanotubos no quirales sean conductores y el resto semiconductores, dados por un patrón de arreglo tomando como referencia el grafeno bidimensional, el cual puede ser descrito por la distribución de las esquinas de los hexágonos, llamados puntos K, dentro del nanotubo, sobre los cuales se definen bandas de conducción por donde pueden pasar los electrones y generar así una corriente eléctrica.

Para el caso de los nanotubos de carbono quirales, la distribución de los hexágonos laterales adoptan un enrollamiento helicoidal que conforma la estructura, con respecto al eje central del tubo que se formará de este arreglo. Este tipo de conformación dificulta el paso de los electrones a las bandas de conducción, y por lo tanto, aproximadamente sólo un tercio de los nanotubos de carbono quirales presenta propiedades de conducción, y cuando las presentan, lo hacen siempre como una función que depende del ángulo definido por el vector quiral sobre la hoja de grafeno.

Estos efectos debidos a la curvatura han sido mostrados experimental y teóricamente como dependientes de la quiralidad, influenciando muchas propiedades de los nanotubos cuando su diámetro es menor que 2nm (Tomárek *et al.*, 2008). Con base en esto, podemos trazar un vector de coordenadas (n, m) sobre un plano (la hoja de grafeno) y representar de este modo las propiedades eléctricas de un nanotubo de carbono, dependiendo de su estructura y de los vectores de onda de los electrones que crucen por los puntos K (los vértices de los hexágonos). Así se han definido tres categorías para los nanotubos, descritas matemáticamente por medio de la siguiente expresión:

$$\text{módulo}[(2n + m), 3] = C; \text{ donde } C = \{1, 2, 3\}$$

Y que a su vez define tres familias: (n - m) = constante; define nanotubos con ángulos quirales similares pero que tienen diámetros distintos. (2n + m) = constante; define nanotubos de carbono de pared sencilla, de diámetro similar pero diferente ángulo quiral. Y (n + 2m) = constante, que define al resto.

Las tres categorías definen tubos semiconductores cuando $C = \{1, 2\}$, es decir, cuando $\text{módulo}[(2n + m), 3] = 1$ se tienen semiconductores del tipo 1, y cuando $\text{módulo}[(2n + m), 3] = 2$ se tienen del tipo 2. Por su parte cuando se tiene $\text{módulo}[(2n + m), 3] = 0$ el nanotubo de carbono tiene propiedades metálicas (Tomárek *et al.*, 2008). Así, para que un nanotubo de coordenadas (n, m) tenga propiedades metálicas es necesario que $2n + m$ sea múltiplo de 3, lo que es equivalente a que $n-m$ también lo sea (por la definición matemática de módulo, donde a es congruente con b módulo ñ, si y sólo si a-b es divisible entre ñ,

dentro de los números enteros). Así, un nanotubo de carbono puede ser metálico o semiconductor dependiendo de su diámetro y su ángulo quiral (Osman *et al.*, 2007).

El vector quiral denotado por Q^{-h} y el vector de onda asociado con la dirección de este vector son capaces de describir las condiciones periódicas sobre los bordes de los nanotubos, según éstos se orientan en dirección de la circunferencia, definiendo de este modo la estructura electrónica de los nanotubos de carbono. Por lo tanto, el conjunto de las relaciones de dispersión energética en una dimensión de un nanotubo de carbono está compuesto por el deslizamiento de bandas de energía en dos dimensiones en la estructura del grafeno: si uno de los N vectores de onda de un nanotubo pasa a través de un punto K (un vértice del hexágono), entonces la banda de energía en una dimensión tendrá un hueco de energía igual a cero, resultando en un estado de energía degenerado (figura 9). Una densidad finita de estados resultan del cruce de dos bandas de energía de una dimensión, que permite al nanotubo tener una naturaleza conductora como un metal, por el contrario, si los vectores de onda de los nanotubos de carbono no cruzan a través de uno de los puntos K, entonces las bandas de energía en una dimensión no se superponen y el nanotubo será un semiconductor (Osman *et al.*, 2007, figura 9).

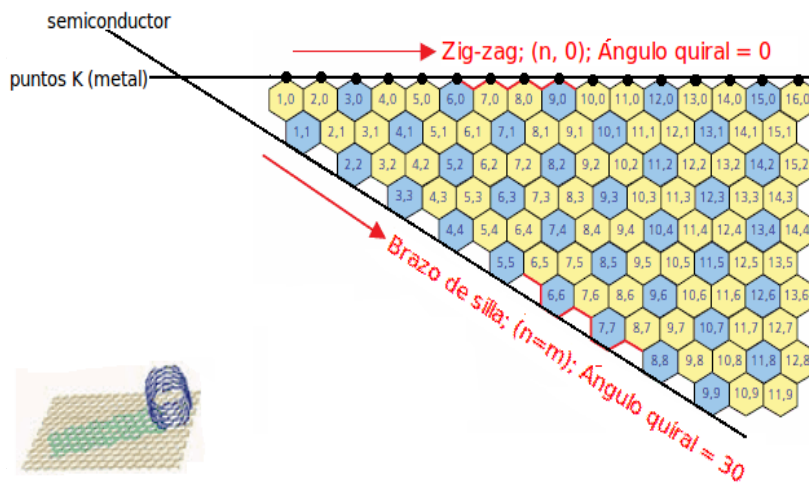


Figura 9.- Enrollamiento del grafeno. Al quedar orientados los vértices de los hexágonos, se permite obtener un nanotubo de carbono con propiedades de conductor. Los parámetros n y m pueden ser observados para cada hexágono y calculados como se detalla en el texto para conocer las propiedades eléctricas del nanotubo.

Sus propiedades mecánicas están dadas principalmente por el tipo de enlace sp^2 formado entre los átomos de carbono, confiriéndoles una alta capacidad para soportar granes presiones y fuerzas de deformación sin sufrir cambios irreversibles en su estructura interna y poder constituir fibras altamente resistentes. De este modo, cuando son sometidos a esfuerzos de deformación muy intensos pueden deformarse notablemente y mantenerse en un régimen elástico sin comprometer su integridad estructural. Del mismo modo, en cuanto a sus propiedades térmicas, son enormemente estables, logrando mantenerse sin modificación a temperaturas muy elevadas, cercanas a los 4000 K, donde similar a otros polímeros y estructuras de baja dimensión, los nanotubos maximizan su entropía en cuanto a su configuración y su vibración con un costo energético mínimo, dando origen a una contracción térmica en longitud y volumen, en temperaturas elevadas (Tomárek *et al.*, 2008).

Estas propiedades eléctricas, mecánicas y térmicas de los nanotubos de carbono, les confieren actualmente un papel importante en el estudio de estructuras basas en el carbono, pues pueden soportar altas temperaturas sin perder su estabilidad, soportar altas presiones y sufrir deformación sin alterar su estructura geométrica, además de actuar como semiconductores o conductores, y los intermedios entre estos dos extremos, siendo un material idóneo para varias aplicaciones tecnológicas; desde sistemas de cómputo, componentes electrónicos, transportadores de corriente eléctrica, estructuras para la construcción, etc. Sin embargo, en el presente trabajo se les da un papel como putativos sustratos unidimensionales para la interacción electrostática con moléculas ionizadas, y dinámicas de reconocimiento y polimerización por parte de éstas, sobre los nanotubos de carbono, a manera de “rieles” para estos monómeros.

En este sentido, la formación de nanotubos de carbono y su posible presencia en la superficie de partículas de polvo cósmico, meteoritos o demás cuerpos interestelares, les hace potenciales sustratos asimétricos de condensación de moléculas orgánicas, afectando la estabilidad de éstas, al establecer interacciones con los nanotubos. Ya se ha dicho que estos nanotubos quirales pueden ser formados en las atmósferas de estrellas con fuertes campos magnéticos por medio del dicroísmo magnetoquiral, o por el dicroísmo circular ante la presencia de LPC por alguna estrella de neutrones, del mismo modo que los fulerenos en el medio circunestelar (Cataldo y Pontier-Jonhson, 2002), esto último, de manera similar a la propuesta hecha por Bonner y Rubenstein (1987), para el caso de los aminoácidos.

Marco Teórico y Definición de Nuestra Teoría

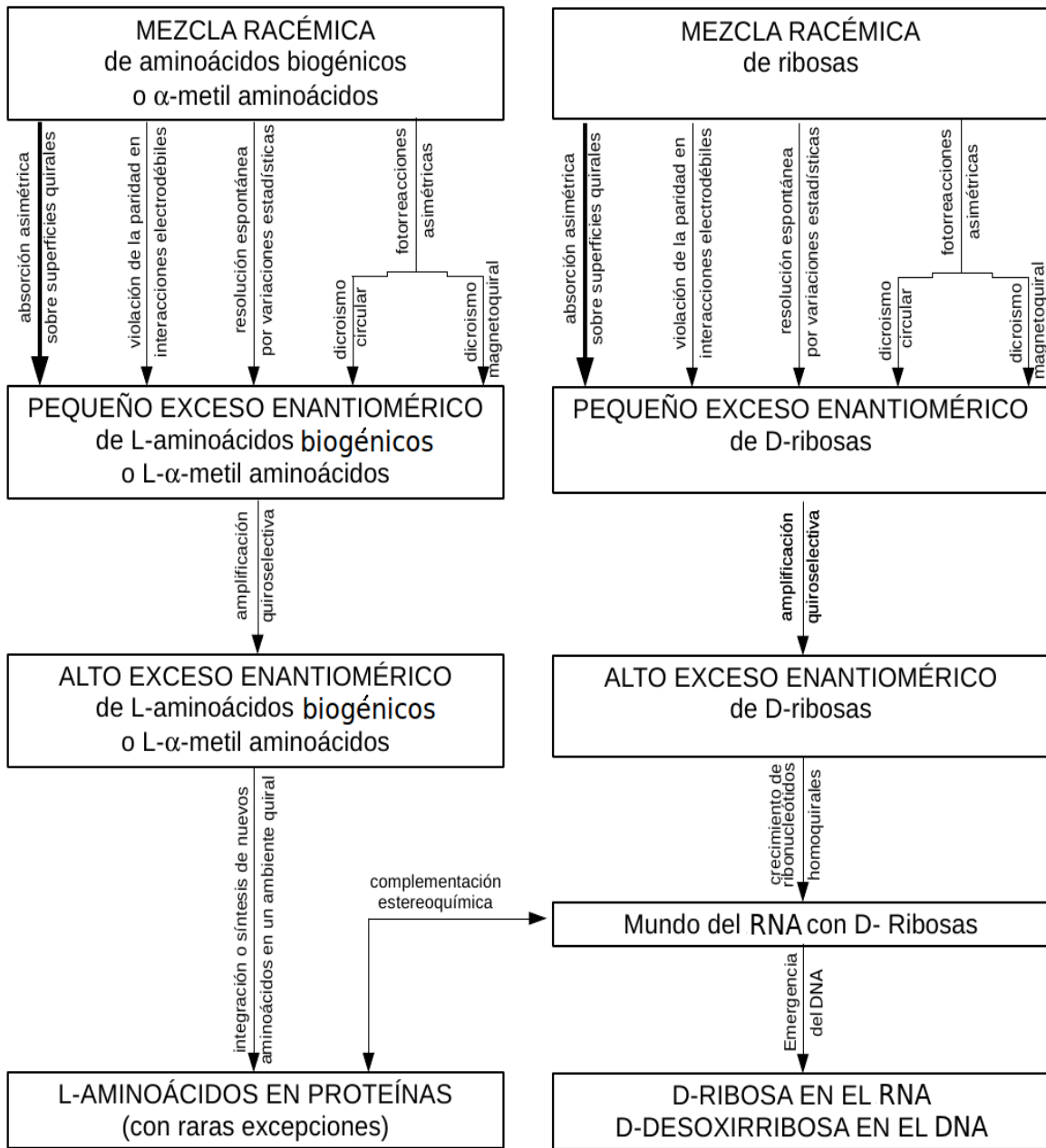
Teorías sobre el Origen de la Actividad Óptica en un Sistema Prebiótico

A pesar de existir varias ideas por medio de las cuales se puede considerar algún mecanismo para inducir la ruptura espontánea de la simetría en mezclas racémicas, son cuatro los mecanismos que han sido postulados con mayor formalidad para generar sistemas con una elevada pureza óptica. Además, la llamada autocatálisis enantioselectiva ha sido propuesta como un mecanismo que permite la amplificación de una inicial asimetría en la concentración de un enantiómero en una mezcla, reforzando el efecto inicial provocado por cualquiera de los cuatro mecanismos generales que se han propuesto. Sin embargo, éstas reacciones de autocatálisis pueden no ser necesarias para considerar el origen de la homoquiralidad si la ruptura espontánea de la simetría es de tal magnitud que el exceso enantiomérico que se genera es el suficiente para alejar de la condición racémica a la mezcla, o permitir la interacción homoquiral de los elementos, alejándola así de la simetría presente en su dinámica interna. Las reacciones de autocatálisis, y en particular la reacción de Soai (Anexo 3), han sido hasta ahora necesarias para justificar el incremento en el exceso enantiomérico a partir de un inicial desbalance quiral. Nosotros en este trabajo, al considerar la absorción asimétrica sobre superficies quirales como el mecanismo capaz de inducir la RES necesaria para generar interacciones homoquirales entre elementos moleculares del sistema (en particular, entre aa), prescindiremos de este paso, bajo el supuesto de que el aporte de L-ee extraterrestre, y un ambiente prebiótico alejado del equilibrio, como propone Kompanichenko (2008), favorece el establecimiento de redes de interacción, donde puede establecerse una dinámica entre aminoácidos de la misma

quiralidad y soportar así el establecimiento de un sistema biogénico y la ganancia de orden en su interior (y de una alta pureza quiral en sus cadenas peptídicas).

De manera general, estos cuatro procesos o vías que intentan explicar el origen de la actividad óptica, son esquematizados a continuación en la figura 10; donde es importante resaltar que todos consideran necesario un primer paso, donde un ligero ee es creado a partir de una mezcla racémica inicial. Este primer paso es el más debatido, y donde nos ubicamos con esta tesis. Los pasos que le siguieron a este inicial desajuste quiral son aquellos por medio de los cuáles los organismos vivos han llegado a su condición homoquiral actual. Estos pasos posteriores incluyen procesos de amplificación del ee inicial, que en esta tesis consideramos a las dinámicas no lineales y procesos fuera del equilibrio para tal efecto.

↓ **Figura 10.- Principales vías propuestas para el origen de la quiralidad biológica.** Se muestran las vías más aceptadas para explicar la aparición de la condición homoquiral en los biopolímeros de los organismo actuales. Nótese que estas vías no son procesos exclusivos para la Tierra, pudiendo todos ellos situarse en un contexto extraterrestre en el medio interestelar. En la figura se hace énfasis en la vía definida por la absorción enantioselectiva sobre superficies quirales, debido a que es la vía sobre la que se basa la propuesta de la presente tesis. *Modificado de Jorissen y Cerf, 2002.*



SITUACION ACTUAL EN LOS SISTEMAS VIVOS

i) variaciones estadísticas

La hipótesis de que este mecanismo permite la aparición de un sistema homocirale se basa en el hecho de que una mezcla racémica no es un sistema estático sino dinámico, es decir, que no en todo momento se encuentra conformada por exactamente un 50% de enantiómeros L o D y un 50% del enantiómero contrario, sino que existen desviaciones estándares entre las concentraciones de cada enantiómero que fluctúan a favor de uno y de otro alternadamente, manteniendo la condición racémica en la mezcla. Según esta idea, una ruptura espontánea de la simetría debida a las fluctuaciones estadísticas que se salgan de

estas oscilaciones estándares a favor de un enantiómero, reforzada por la amplificación autocatalítica, puede ser la base para el origen de la homoquiralidad en un sistema.

Cronin y Reisse (2005) ejemplifican esta idea citando a Mills en un trabajo de 1932: “*nosotros podemos contar, sobre la base de las leyes de la probabilidad, con la existencia de un diminuto favorecimiento inicial hacia un sistema óptico u otro; y esto podría, si los principios que me esfuerzo por explicar son justificados, eventualmente permitir la completa actividad óptica de los componentes molecularmente asimétricos de toda la materia viva*”.

Sin embargo, esta hipótesis del origen estadístico en un sistema homoquiral, producto de las variaciones abruptas de las mezclas racémicas, se enfrenta al problema de que este mecanismo no es específico ni preferencial al momento de favorecer inicialmente un enantiómero particular, teniendo ambos isómeros ópticos la misma probabilidad de obtener un exceso enantiomérico a su favor. Por esto, la presencia en un ambiente general de sistemas con un exceso enantiomérico en un isómero en particular se ve contrarrestada por la presencia de otros sistemas con un exceso enantiomérico en el isómero óptico opuesto; dando como consecuencia que el ambiente global que los contiene presente una mezcla racémica de estos sistemas asimétricos particulares, con las mismas desviaciones estándares en el número de ellos, pero manteniendo la condición racémica global. Es decir, y particularizando este argumento, la creación de un sistema asimétrico, a favor de un enantiómero, causado por estas variaciones estadísticas, tiene la misma probabilidad de ser creado que la de otro sistema asimétrico de quiralidad opuesta; por lo que no existe una tendencia o preferencia particular para generar sistemas con una quiralidad específica, y la creación de varios de estos sistemas asimétricos, dentro de un ambiente general que los contiene, presenta las mismas variaciones estadísticas de manera global que las presentes en cada sistema particular, dando como resultado un ambiente racémico; y resultando un mecanismo poco viable para inducir la RES sobre moléculas potencialmente biogénicas.

ii) violación de la paridad

La violación de la paridad es un fenómeno que se da a nivel subatómico en la fuerza nuclear débil. Se encuentra relacionada con la quiralidad debido a que si se tienen, por ejemplo, dos electrones con la misma quiralidad, éstos interactuarán con mayor fuerza y lo harán más rápido que si se tienen dos electrones con quiralidad opuesta. Esta quiralidad en los electrones está dada según su momento angular intrínseco y su cantidad de movimiento con el que se desplazan: si el sentido del espín de una partícula es el mismo que el de su cantidad de movimiento, entonces esta partícula tiene quiralidad derecha; y si por el contrario, el sentido de su espín es opuesto al sentido de su cantidad de movimiento, entonces su quiralidad es izquierda (Moshinsky, 2008). Sobresimplificando lo anterior, podemos considerar a una partícula que se encuentra rotando sobre sí misma (lo que sería el espín), y que además se desplaza en una dirección dada (lo que sería la cantidad de movimiento); si ambos movimientos tienen el mismo sentido, entonces se dice que la partícula tiene quiralidad derecha, pero si ambos movimientos presentan sentidos opuestos, entonces se dice que la quiralidad de la partícula es izquierda. La violación de la paridad, por lo tanto, se refiere a la existencia de energías de interacción distintas entre partículas (elementales) que sólo difieren en su quiralidad, y a esta diferencia de energía entre cada partícula quiral se le denomina *diferencia de energía en la violación de la paridad* (DEVF),

y es un criterio que se ha empleado para inferir si dentro de una mezcla racémica la DEVP es tal que favorezca no sólo la interacción entre partículas de la misma quiralidad, sino que permita a uno de los enantiómeros hacerlo con una mayor frecuencia, dada su mayor energía para interactuar, induciendo así una RES hacia un sistema óptimamente activo.

Como esta violación de la paridad es un fenómeno que se observa en las partículas sólo cuando su interacción es débil (Moshinsky, 2008), la idea de identificar una diferencia de energía en la violación de la paridad que favorezca la interacción para los L-aminoácidos ha dado resultados controvertidos, que además dependen de la conformación asumida para las moléculas en cuestión, así como del método particular empleado para el cálculo (Cronin y Reisse, 2005).

Además, la violación de la paridad, al darse entre partículas elementales y sólo en las interacciones débiles, requiere de muy bajas temperaturas, cercanas al cero absoluto, para reducir la energía de estas partículas elementales. Chala-Flores (1994) asume que un gradiente de temperatura podría inducir a una mezcla racémica de aminoácidos romper de manera espontánea su simetría en forma de espejo, separándose así las fases quirales debido al condensado de Bose. Debido a esto, y con base a este condensado donde las longitudes de onda de los átomos individuales se suman y éstos se comportan como un “superátomo”; para que la violación de la paridad con un signo particular (+ o -) tenga efecto a nivel macromolecular, las temperaturas a las cuales se da el proceso deben ser muy bajas, restringiendo así la RES a ambientes fríos, además de que la controversia en los cálculos para mostrar que la quiralidad de las moléculas biológicas es la “correcta” (que la DEVP favorece la interacción entre L-aminoácidos, por ejemplo), aún espera por datos que comiencen a mostrar la validez o invalidez de esta hipótesis; no pudiendo establecer de manera fehaciente, por el momento, una relación causal entre la violación de la paridad y la homoquiralidad presente en los sistemas biológicos.

Cuando Abdus Salam (en 1964) hizo la formulación matemática de la DEVP, en estas interacciones débiles, mostró que las partículas con quiralidad izquierda presentaban una mayor energía, permitiendo a otros investigadores sugerir que la quiralidad L de los aminoácidos era una consecuencia de esta DEVP. De ser cierta esta hipótesis, el fenómeno de la homoquiralidad biológica sería un fenómeno Universal al estar presente en todos los átomos a nivel de sus partículas elementales, y siendo la DEVP un fenómeno que favorece la condición homoquiral en los L-aminoácidos en cualquier sistema, sea biológico o no; quedando sólo por aclarar si es necesario que actúe alguna reacción de autocatálisis enantioselectiva para conseguir la condición homoquiral. Pero hasta que no haya una confirmación experimental, esto sigue siendo un planteamiento seriamente debatido.

iii) fotodegradación asimétrica inducida por la luz polarizada circularmente

La hipótesis que propone a la fotólisis enantioselectiva como la causante inicial de un exceso enantiomérico se basa en los resultados obtenidos en los diversos laboratorios que han empleado la LPC para generar destrucción preferencial (o síntesis preferencial) de un tipo de isómero, e inducir de este modo un exceso enantiomérico en el residuo. De los primeros reportes de este tipo de experimentos que se tienen en la literatura es el dado por Kuhn y Braun en 1929, quienes mostraron que es posible una fotólisis parcial de una mezcla racémica al irradiarla con luz ultravioleta polarizada circularmente, originando así

un exceso enantiomérico en el residuo de la mezcla irradiada (citado por Cornin y Reisse, 2005). Por su parte, Balavoine *et al.* (1974) reportan lo obtenido en sus experimentos al irradiar también con luz ultravioleta polarizada circularmente una mezcla racémica de α -azido-N, N-dimetilpropinamida, obteniendo una pureza óptica de $19.9\% \pm 2\%$; permitiendo generar un tratamiento teórico para lograr calcular la pureza enantiomérica que puede ser alcanzada según el grado de fotodestrucción de los enantiómeros, mostrando que al permitir que la reacción se desarrolle hasta el 99% de destrucción de la mezcla racémica inicial, se obtiene en el residuo una pureza enantiomérica de 35.5%. Concluyendo que la obtención de una pureza óptica muy alta es posible por esta vía.

En 1977, dos trabajos independientes, uno de Nordén y otro de Flores *et al.*, mostraron que los aminoácidos pueden ser sometidos a fotodestrucción enantioselectiva si se les irradia con luz ultravioleta polarizada circularmente, debido a las diferencias existentes entre las formas enantioméricas en los coeficientes de extinción, al recibir esta irradiación. Además de la fotólisis enantioselectiva, la LPC también ha sido propuesta para efectuar una síntesis enantioselectiva contando con reactantes aquirales, donde la luz polarizada circularmente es el único elemento quiral, de acuerdo con el principio de asimetría de Curie: “*cuando ciertas causas producen ciertos efectos, los elementos de simetría de las causas deben ser encontrados en los efectos del producto. Cuando ciertos efectos revelan una cierta asimetría, esta asimetría deberá ser encontrada en las causas que le dan origen*” (citado por Cronin y Reisse, 2005).

De este modo, para explicar el exceso enantiomérico hallado en los meteoritos Murchison, Allende y Murray de L-aminoácidos, se ha propuesto con base a los resultados experimentales que la LPC proveniente de una estrella de neutrones fuese la causante de dicha asimetría (Bonner y Rubenstein, 1987), y es la propuesta más aceptada actualmente para explicar el exceso enantiomérico inicial en los aminoácidos de meteoritos. Esto sitúa el origen del exceso enantiomérico en las regiones del espacio exterior, donde la LPC es capaz de incidir sobre las partículas, aún faltando por identificar la existencia de las longitudes de onda UV de esta luz, capaz de ser absorbida por los aminoácidos. A la superficie terrestre, esta luz ultravioleta polarizada circularmente no llega con la suficiente intensidad para tener un efecto significativo sobre las mezclas racémicas de aminoácidos (Bonner y Rubenstein, 1987), por tal motivo el origen cósmico del exceso enantiomérico de las moléculas orgánicas y, en particular, de los L-aminoácidos, se sitúa como una opción plausible.

iv) absorción enantioselectiva sobre superficies quirales

La propuesta de considerar la acción de un sustrato quiral para inducir RES, en el contexto del origen de la condición homoquiral de los sistemas biológicos no ha sido explorada ni desarrollada con la misma proporción que los casos de la violación de la paridad y, aún más, las fotorreacciones enantioselectivas. Esta propuesta no es nueva (el fenómeno de la absorción enantioselectiva sobre superficies quirales se conoce desde 1935), sin embargo, la literatura que la considera es muy escasa y los éxitos experimentales con la irradiación de LPC sobre mezclas racémicas de moléculas orgánicas, logrados desde muy temprano, han precipitado las teorías hacia ese contexto, dejando la posibilidad de la RES por acción de sustratos quirales en segundo plano.

En el año 2003, Hazen y Sholl realizaron una revisión de los datos experimentales sobre los fenómenos de absorción de moléculas quirales empleando como fuente de dicha asimetría, superficies quirales minerales como el cuarzo y otros óxidos metálicos, presentando resultados positivos con absorciones preferenciales de uno de los enantiómeros al interactuar con las superficies cristalinas asimétricas. Estos resultados muestran, por ejemplo, la absorción de alanina sobre superficies de cuarzo D o L, donde en ambos casos se produjo un exceso enantiomérico (de D o L de alanina) del $95 \pm 2\%$ promovándose además la síntesis de dicho aa por parte del cristal.

Hazen *et al.* (2001), propusieron un escenario donde una absorción asimétrica de aa quirales sobre superficies minerales también quirales de calcita, de cuarzo o de arcillas pudo haber inducido esta RES y catalizar la formación de péptidos homoquirales. Cronin y Reisse (2005) dan ejemplos de cómo esto puede suceder al presentarse fenómenos de nucleación primaria, tanto para el cuarzo como para el clorato de sodio (ambas moléculas aquirales): estos procesos de nucleación dan origen a agregados cristalinos quirales tanto L como D, en proporciones racémicas, los cuáles, en un ambiente de agitación, se provoca su ruptura permitiendo que cada nuevo fragmento sirva como un centro para la nucleación secundaria y, dependiendo de qué cristal se rompa primero para servir como centro de nucleación, tendrá una mayor tasa de formación de cristales y puede provocarse así una RES, dando origen a una superficie mineral asimétrica a veces a favor del cristal L y a veces del D. En el caso del cuarzo, tanto los L-cristales como los D-cristales son capaces de absorber especialmente uno de los enantiómeros de aa; sin embargo, este proceso requiere de condiciones hídricas muy controladas (Bonner, 1994), por lo que resulta muy poco probable que este mecanismo basado en superficies minerales haya estado presente en la Tierra prebiótica o, incluso, en las superficie de meteoritos. Otro resultado positivo fue el logrado por Julg (1998), cuando logró inducir un sustrato asimétrico de caolita, con resultados similares.

Sin embargo, y a pesar de estos resultados positivos, un escenario para la RES de aminoácidos inducida por la absorción enantioselectiva sobre superficies quirales minerales no ha sido contundente debido a que estas superficies de cristales, al depender de eventos de nucleación, se hacen poco probables por requerir temperaturas específicas, además de pH, altas concentraciones de moléculas que los formen para provocar la sobresaturación en un medio acuoso y permitir que el cristal se forme, así como una relativamente alta pureza en el medio, pues la formación de un cristal de cierto tipo de mineral requiere que éste sea un componente principal en el ambiente, y no un elemento secundario.

Otra serie de resultados pueden mostrarnos que no sólo estas superficies minerales pueden absorber enantioselectivamente una molécula quiral, pues superficies quirales constituidas por metales, como el cobre, también han sido útiles para inducir síntesis o absorciones asimétricas de moléculas quirales orgánicas (ver resultados bibliográficos presentados más adelante en esta tesis).

Una serie de experimentos reportados en la bibliografía resultan interesantes al demostrar que la síntesis asimétrica de azúcares empleando dímeros homoquirales de aminoácidos, y viceversa (síntesis asimétrica de aminoácidos por medio de oligómeros de azúcares homoquirales), puede inducir excesos enantioméricos (Weber, 1998; Pizzarello y Weber,

2010). Estos experimentos parten de un ambiente aquiral, al provocar reacciones de condensación de la formamida y amonio como putativos gases presentes en el ambiente prebiótico. Sin embargo, nuevamente este escenario en el contexto interestelar sobre superficies de meteoritos se topa con problemas: principalmente, si los azúcares o los aminoácidos con cierta quiralidad logran inducir la síntesis asimétrica ya sea de aa, para el primer caso, o de azúcares para el segundo, sólo se demuestra que la hoquiralidad en un tipo de molécula puede ser “heredada” al otro, pero no se explica el inicio de esta condición homoquiral en los azúcares o en los aa iniciales que participan en la reacción.

Este escenario que considera la absorción enantioselectiva es al cual nos referimos en esta tesis, y dentro del cuál desarrollamos nuestra propuesta teórica con el aporte novedoso de que consideramos no una superficie mineral, sino orgánica asimétrica, y a diferencia de los experimentos de Weber y Pizzarello, proponemos a los nanotubos quirales de carbono para constituir esta superficie, además de que consideramos, como lo hacen en estos trabajos empleando aa o azúcares, un ambiente aquiral de reacción del cual se parte para inducir la RES hacia los L-aa en meteoritos. Pero a esta propuesta debemos darle un sustento y justificación, cosa que ya hemos estado haciendo y que a continuación ampliamos para mostrar la evidencia de que los nanotubos quirales de carbono pueden: i) estar presentes en el MIE, ii) pueden estar presentes en los meteoritos, y iii) son capaces de inducir la síntesis asimétrica de aminoácidos quirales.

La Conexión Interestelar: Material Interestelar y Cometas

La vida tiene como base material una organización molecular en los componentes que la constituyen como un sistema dinámico. Algunas concepciones históricas humanas la han considerado como un hecho aislado y único. Por el contrario, nosotros en esta tesis nos identificamos con la generalización de ella como un tipo de organización de la materia peculiar, que permite el establecimiento de cierta dinámica en sistemas constituidos a partir de ese arreglo de las fuerzas físicas y químicas que dominan no sólo en el planeta Tierra, y que siguen un curso temporal y evolutivo de la organización de la materia que va desde el mundo inorgánico, hasta la dinámica de los sistemas biológicos.

En tal sentido, la observación en la naturaleza, en sistemas completamente abióticos, de procesos o fenómenos análogos a procesos biológicos, incluso aquellos hallazgos obtenidos del espacio exterior, han permitido reforzar la idea de la generalización de los fenómenos bióticos como hechos que pueden verificarse fuera de los sistemas vivos. Estos fenómenos, aunque presentes en los sistemas no vivos, al converger de un modo ordenado dentro de los organismos, son los que aportan las condiciones fisicoquímicas para la autoorganización inicial de los sistemas biológicos, como se discutirá más adelante en nuestra segunda propuesta de esta tesis, y que aún cuando falta por identificar cabalmente estas condiciones fisicoquímicas, una de ellas parece ser la condición homoquiral de los elementos que sean quirales dentro del sistema, siendo ésta una característica en los sistemas biológicos que se han desarrollado en la Tierra (ver propuesta 2 de este trabajo). Dado que en esta primera propuesta nosotros sugerimos la existencia de nanotubos quirales de carbono, vinculando así a estas estructuras con los procesos del origen de la vida, es necesario presentar a continuación la evidencia que sustenta nuestra sugerencia de estas estructuras en el MIE.

Según se estima, el MIE consiste de gas y polvo que constituyen entre el 20 y el 30% de la masa en nuestra galaxia (Ehrenfreund y Charnley, 2000), del cual, mucho de este material ha sido eyectado por viejas estrellas en vías de extinguirse. Sobre la superficie de estas partículas de polvo, los gases encuentran un medio para condensar, dándose así un fenómeno de nucleación donde la superficie de las partículas de polvo sirven como sustrato para ello y, posteriormente, como catalizadores de reacciones que permiten la formación de diversas especies moleculares a partir de átomos simples como el hidrógeno o el helio. Estos granos de polvo interestelar, al colapsar entre sí, potencialmente pueden formar futuras generaciones de estrellas que pueden desarrollarse en sistemas planetarios. Ante el intervalo de temperatura en el medio interestelar, que fluctúan entre 10 y 10^4 K, las variaciones en densidad (de 100 a 10^8 átomos de H/cm³), y los campos de radiación ultravioleta inducidos por los rayos cósmicos (Ehrenfreund y Charnley, 2000), se originan ambientes de reacción donde las diversas fuerzas químicas y físicas pueden combinarse de maneras diferentes para originar la diversidad molecular que se ha dado y que se estudia actualmente.

Desde el año 2000 en que se ha presentado un inventario molecular del espacio exterior por medio de los espectros de longitudes de onda que han sido captados desde la Tierra (cuadro 1), se tiene conocimiento de la amplia variedad de moléculas de carbono, desde pequeñas hasta de gran tamaño con una diversidad de formas enantioméricas e isómeros estructurales, de donde han sido identificados los hidrocarburos aromáticos policíclicos, fullerenos, cadenas de carbono, diamantes, carbono amorfo y redes complejas de moléculas aromáticas del tipo del querógeno.

↓**Cuadro 1.** Moléculas orgánicas en el medio circunestelar e interestelar. *Modificado de Ehrenfreund y Charnley, 2000.*

Número de Átomos

2	3	4	5	6	7	8	9	10
H ₂	C ₃	c-C ₃ H	C ₅	C ₅ H	C ₆ H	CH ₃ C ₃ N	CH ₃ C ₄ H	CH ₃ C ₅ N?
AlF	C ₂ H	l-C ₃ H	C ₄ H	l-H ₂ C ₄	CH ₂ CHC	HCOOCH ₃	CH ₃ CH ₂ CN	(CH ₃) ₂ CO
AlCl	C ₂ O	C ₃ N	C ₄ Si	C ₂ H ₄	N	CH ₃ COOH	(CH ₃) ₂ O	NH ₂ CH ₂ C
C ₂	C ₂ S	C ₃ O	l-C ₃ H ₂	CH ₃ CN	CH ₃ C ₂ H	?	CH ₃ CH ₂ O	OOH?
CH	CH ₂	C ₃ S	c-C ₃ H ₂	CH ₃ NC	HC ₅ N	C ₇ H	H	
CH ⁺	HCN	C ₂ H ₂	CH ₂ CN	CH ₃ OH	HCOCH ₃	H ₂ C ₆	HC ₇ N	
CN	HCO	CH ₂ D ⁺	CH ₄	CH ₃ SH	NH ₂ CH ₃		C ₈ H	
CO	HCO ⁺	?	HC ₃ N	HC ₃ NH ⁺	c-C ₂ H ₄ O			
CO ⁺	HCS ⁺	HCCN	HC ₂ NC	HC ₂ CHO				
CP	HOC ⁺	HCNH ⁺	HCOOH	NH ₂ CHO				
CSi	H ₂ O	HNCO	H ₂ CHN	C ₅ N				
HCl	H ₂ S	HNCS	H ₂ C ₂ O					
KCl	HNC	HOCO ⁺	H ₂ NCN					
NH	HNO	H ₂ CO	HNC ₃					
NO	MgCN	H ₂ CN	SiH ₄					
NS	MgNC	H ₂ CS	H ₂ COH					
NaCl	N ₂ H ⁺	H ₃ O ⁺	+					
OH	N ₂ O	NH ₃						
PN	NaCN	SiC ₃						
SO	OCS							
SO ⁺	SO ₂							
SiN	c-SiC ₂							
SiO	CO ₂							
SiS	NH ₂							
CS	H ₃ ⁺							
HF								
							11	13
							HC ₉ N	HC ₁₁ N

Nótese que las observaciones sugieren la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) de gran tamaño y fulerenos en el gas interestelar (Tielens et al 1999, Foing & Ehrenfreund 1997).

Las observaciones astronómicas realizadas con el observatorio espacial en infrarrojo (Infrared Space Observatory), ha arrojado más evidencia de la presencia de compuestos de carbono en el medio interestelar (Figura 11), así como de silicatos y de agua, como lo señalan Ehrenfreund y Charnley (2000) de lo reportado por Giba *et al.* (2000) y Langer *et al.* (2000).

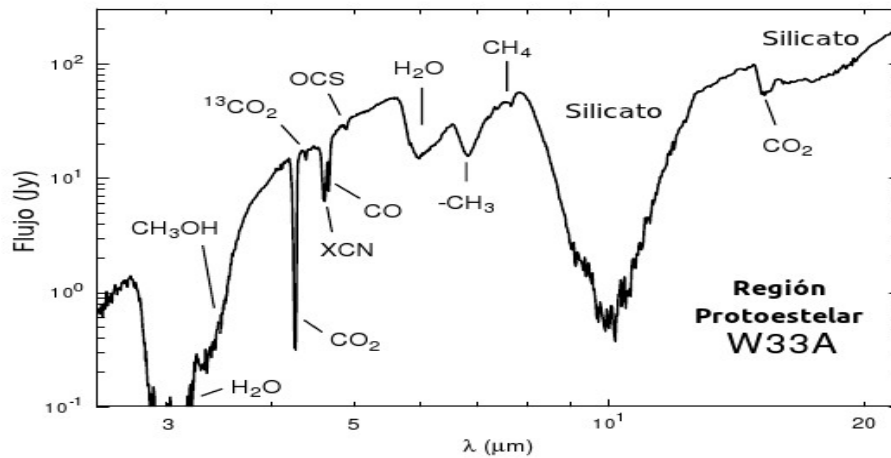


Figura 11. Espectro obtenido a partir del observatorio espacial en infrarrojo y el espectrómetro de longitud de onda corta hacia la región protoestelar W33A. Esta línea de visión densa y fría está caracterizada por altas densidades de columnas de hielo interestelares. Las bandas de absorción dominantes son visibles a $3.0\mu\text{m}$ (hielo de H_2O), $4.27\mu\text{m}$ (hielo de CO_2), $4.67\mu\text{m}$ (hielo de CO) y $10\mu\text{m}$ (silicatos). El espectro entre 2 y $25\mu\text{m}$ muestra varias especies adicionales, muchas de ellas de naturaleza orgánica. *Modificado de Ehrenfreund y Charnley, 2000.*

Contribuyendo a este repertorio molecular en el medio interestelar, las partículas de polvo, que funcionan como catalizadores en donde condensan y reaccionan átomos y moléculas a partir del estado gaseoso sobre su superficie, son transportados a regiones protoestelares activas donde pueden sufrir modificaciones en la composición química de su superficie, siendo un factor importante la irradiación ultravioleta que genera radicales libres y moléculas complejas, en cuyo caso es posible que se generen tanto aquellas que no poseen una barrera energética, como aquellas que sí la poseen al establecerse redes de reacciones estocásticas en el manto de los granos de polvo estelar, propiciando la aparición de ciertas moléculas complejas e impidiendo la aparición de otras; confiriendo de este modo una serie de pruebas que muestran que los procesos que dan origen a moléculas orgánicas complejas como los fullerenos y muy posiblemente los nanotubos de carbono no sólo constituyen procesos abióticos, sino que además estas vías químicas son frecuentes y diversas en el Universo.

En el caso de los meteoritos, se ha identificado que contienen moléculas basadas en el carbono, que van desde la presencia de aminas y amidas, hasta purinas y pirimidinas; pasando por hidrocarburos alifáticos y aromáticos, aminoácidos, ácidos carboxílicos y material del tipo del querógeno (Pizzarello, 2007). Los meteoritos condritas carbonáceas se denominan así debido a la gran cantidad de moléculas orgánicas que se han identificado en su composición. De los más estudiados son los meteoritos Allende, Murchison y Murray, de donde, en el caso del meteorito Allende, la presencia de “cebollas” de carbono sugieren que fullerenos complejos o nanotubos de carbono pueden estar presentes en los meteoritos, mientras que en el inventario molecular del meteorito Murchison se ha identificado la presencia de ácidos hidrocarboxílicos y aminoácidos, ambos altamente enriquecidos en deuterio confirmando su origen extraterrestre (Ehrenfreund y Charnley, 2000); mostrando

así la existencia de procesos interestelares que originan estas moléculas orgánicas, estrechamente relacionadas con la vida.

Este catálogo molecular y las moléculas orgánicas identificadas en el MIE no representan procesos estáticos ni terminados, sino dinámicos y en constante cambio: Aikawa y Herbst (1999), mostraron que las proporciones cometarias D/H pueden ser producidas en las regiones fuera de los discos protoestelares, lo que soporta la idea de que los volátiles cometarios son una mezcla de materia interestelar y materia que es producida *in situ* sobre los meteoritos. Por su parte, las proporciones elementales e isotópicas de gases nobles en muchos granos de SiC meteorítico muestran la evidencia de material enriquecido por procesos de nucleosíntesis. En el cuerpo parental interestelar de los meteoritos, al fundirse el hielo de agua, resulta un medio apropiado para la aparición de una variedad de reacciones químicas que originan moléculas orgánicas en solución (alteración acuosa), permitiendo la formación de una segunda generación de moléculas orgánicas más complejas; tal es el caso de los aminoácidos, donde el α -ácido aminobutírico y la isovalina, siendo componentes meteoríticos pero estando ausentes en los sistemas biológicos terrestres, su origen suele ser explicado por alteraciones acuosas a partir del cuerpo parental.

Los meteoritos, al impactarse sobre las superficies planetarias, depositan sus elementos moleculares en ellos, contribuyendo en su composición molecular. La amplia gama de compuestos basados en el carbono presentes en la composición química tanto de los cometas como de los meteoritos, exhibe componentes moleculares análogos a los sistemas biológicos (como los α -metil aminoácidos), los cuales pueden interactuar con las moléculas nativas fácilmente, al ser moléculas con las mismas propiedades químicas generales, e influir sobre sus procesos y futura organización.

Para fines de nuestra propuesta, una evidencia de este aporte extraterrestre de las moléculas orgánicas hacia la Tierra es el dado por los trabajos de Becker *et al.* (2000), donde se midieron las proporciones isotópicas de helio (He^3/He^4) atrapado en fulerenos contenidos en los meteoritos (condritas carbonáceas) Allende y Murchison, y comparados los valores con la proporción He^3/He^4 hallada en los fulerenos obtenidos de la capa geológica correspondiente al límite Cretácico/Terciario en la localidad Stevens Klint, en Dinamarca. Los resultados de las mediciones hacen concluir que las proporciones He^3/He^4 encontradas sólo pueden darse en ambientes extraterrestres y que este gas fue introducido dentro de los fulerenos al tiempo en que se formaron tales estructuras a manera de jaula, lo que vincula el origen de los fulerenos terrestres con el de los fulerenos meteoríticos, y éstos a un ambiente interestelar. Además, por medio de espectroscopía de masas por desabsorción láser, se ha logrado obtener perfiles de la composición, en cuanto al número de átomos de carbono, de las moléculas orgánicas presentes tanto en las condritas carbonáceas Allende (Becker *et al.*, 1999) y Murchison (Becker *et al.* 2000), y comparar su espectro obtenido con el logrado en esta última referencia bibliográfica para el de los fulerenos extraídos del límite Cretácico/Terciario en la Tierra. De estos perfiles de desabsorción (figura 12) se puede concluir que la composición en el número de átomos en las moléculas de carbono es muy similar, tanto en los fulerenos meteoríticos como en los terrestres; sugiriendo un mismo

origen extraterrestre en el medio interestelar, reforzado por la proporción He^3/He^4 hallada en los fulerenos del Murchison y en los del límite Cretácico/Terciario.

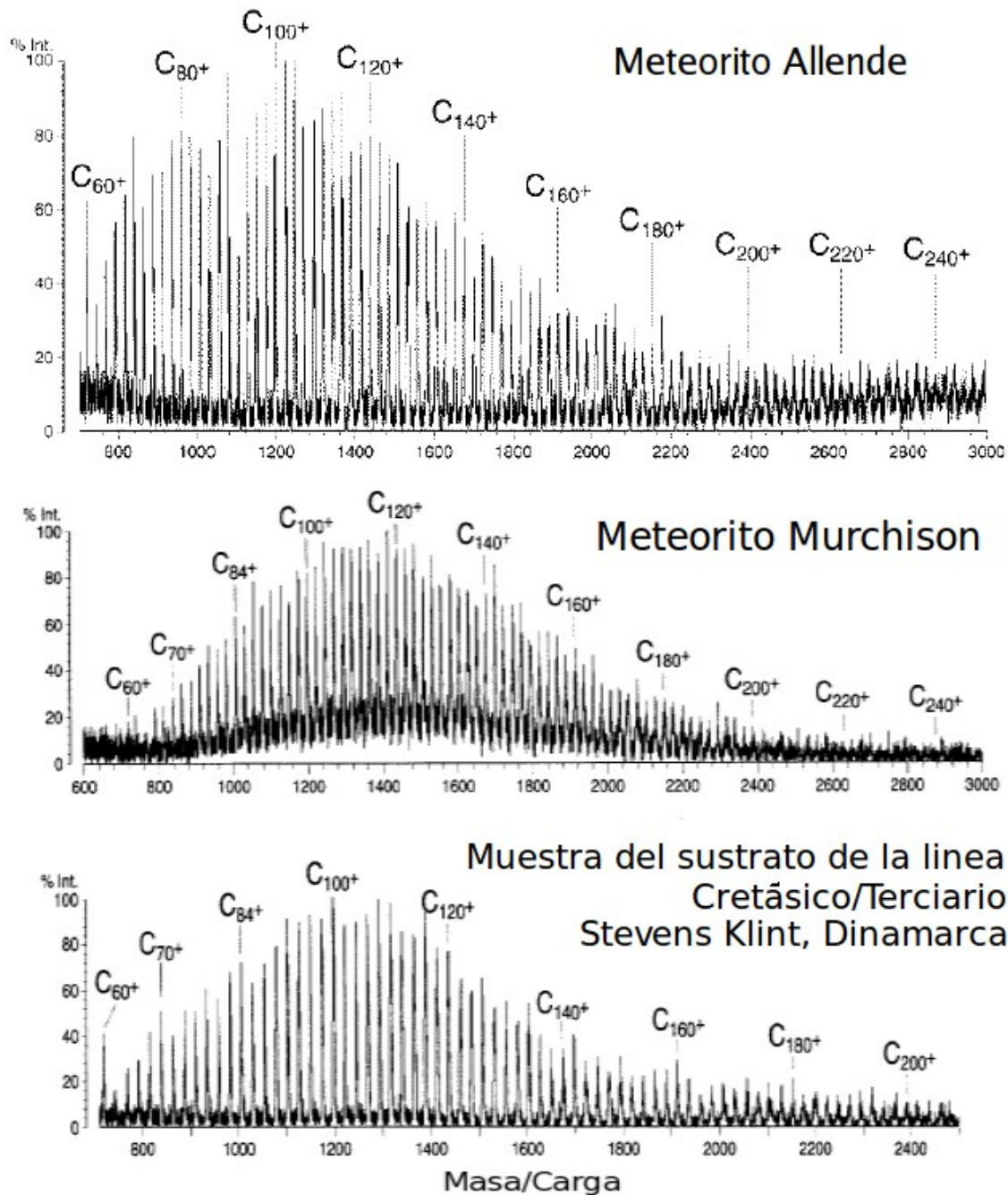


Figura 12.- Espectrometría de masas por desabsorción láser de los meteoritos Allende (tomado de Becker, 1999), Murchison y del límite Cretácico/Terciario de la localidad Stevens Klint (tomado de Becker, 2000).

La presencia de fulerenos de origen extraterrestre en la Tierra, son la prueba de que moléculas de carbono complejas, en estado sólido, pueden ser depositadas en la superficie

de los planetas cuando un meteorito les impacta. Se ha reportado que en el medio interestelar, los fulerenos no son los únicos compuestos de carbono, y que el grafito, los diamantes, hidrocarburos aromáticos policíclicos, cebollas, tubos y otras estructuras a escala no nanométrica son frecuentes (Henning y Salama, 1998; citado por Ehrenfreund y Charnley, 2000.). Conforme los instrumentos de medición han avanzado, las estructuras nanométricas han comenzado a ser descritas en el medio interestelar. Es así como la presencia de nanotubos de carbono, no sólo en el medio interestelar sino en la composición de las contritas carbonáceas, ha sido planteada como una posibilidad plausible: entidades de tamaño nanométrico (cerca de 166 a 830 nm), tales como esferas huecas y tubos de carbono pueden estar embebidos en el material orgánico insoluble y constituir poco más del 10% del total de este material en las contritas carbonáceas (Pizzarello, 2007).

La revisión hecha por Pizzarello (2007) sobre el amplio isomerismo de las moléculas orgánicas encontrado en las condritas carbonáceas, es un indicio de lo anterior, pues enfatiza la importante desviación de la distribución aleatoria de los isómeros ópticos, los cuales dominan con una homogeneidad quiral en los 2-alkil-2-aminoácidos de 5 a 8 carbonos y en los 2-ácido metilglutámico dicarboxílico, que han sido hallados con un ligero exceso enantiomérico en la configuración L, tanto en el meteorito Murchison como en el Murray; haciéndose evidente que la ruptura de la simetría en una mezcla racémica de aminoácidos a favor de un exceso L-enantiomérico puede llevarse a cabo en el medio interestelar, tanto en aminoácidos proteinogénicos como en aquellos que no se encuentran formando parte de los organismos vivos. Además, dado que estos α -metil aminoácidos son raros, o incluso se encuentran ausentes en los seres vivos terrestres, su hallazgo en la composición orgánica de las condritas carbonáceas es una evidencia del aporte no sólo molecular, sino de ciertas propiedades manifestadas en estos elementos materiales, producto de fuerzas imperantes en el MIE, pudiendo colaborar con un aporte asimétrico de aminoácidos en el ambiente prebiótico del planeta Tierra.

Si este exceso L-enantiomérico presente tanto en los sistemas biológicos (en condiciones homoquirales), así como en los meteoritos no tiene relación alguna entre uno y otro sistema, entonces todo se trata de una muy curiosa y afortunada coincidencia.

El Problema del Dicroísmo Circular

Si suponemos que todos los L-aa absorben más rápido la LPC de una quiralidad específica ((+) o (-)), que los D-aa, puede esperarse que su tasa de respuesta hacia dicha fuente asimétrica sea mayor. Aún más, ésta suposición lleva explícita la afirmación de que todos los L-aa, sin importar el tipo del que se trate, pueden ser excitados en el mismo sentido por la LPC a cierta longitud de onda; es decir, se supone no sólo una heterogeneidad en la velocidad de respuesta ante la LPC por parte de los L-enantiómeros de los aa, sino que se supone la existencia de un mismo sentido en la respuesta por parte de todos los L-aa que participaron en conformar la mezcla biogénica dentro de un escenario prebiótico. Debido al fenómeno del DC, podemos identificar dos problemas medulares en esta hipótesis que considera la LPC: por un lado, y con base a la regla de la suma cero de Kuhn-Condon, tenemos que cuando una molécula quiral es irradiada con LPC, sus bandas de absorción alternan en signos opuestos, generando una mayor absorción del enantiómero L o del

enantiómero D según la longitud de onda empleada, sumando cero dentro del espectro completo al cuál absorben y; por el otro lado, dado que el DC es dependiente de la longitud de onda, y no es igual para todos los aminoácidos, al irradiar con cierta λ , un conjunto de moléculas quirales puede presentar bandas de absorción con signos opuestos para cada tipo molecular, cancelándose y reduciendo de manera drástica algún ee generado. En ambos casos, la condición racémica es mantenida o fácilmente recuperada en la mezcla.

Para que un exceso enantiomérico inicial a partir de una mezcla racémica de aminoácidos, como la observada en las muestras de condritas carbonáceas pueda darse, es necesario reunir tres condiciones indispensables, según lo apuntan Jorissen y Cerf (2002):

La primera consiste en que debe de existir un intervalo específico de LPC-UV, en el cuál los coeficientes de absorción para una mezcla racémica de un tipo de aminoácido esté dentro de esta longitud de onda, y sus bandas de absorción sean del mismo signo (+ o -); de lo contrario, un intervalo no específico en el espectro de LPC puede incluir diversas bandas de absorción del aminoácido, las cuales pueden presentar signos contrarios y hacer que las diferencias en los coeficientes de absorción sumen cero dentro de todo ese espectro de LPC.

La segunda implica que la ventana espectral a la cual esté confinada la irradiación de LPC-UV, todos los aminoácidos biogénicos (o α -metil aminoácidos) presenten bandas del dicroísmo circular de un sólo signo, y que sea el mismo para todos.

Finalmente, la tercera condición es que la LPC-UV debe de ser la última radiación de luz UV a la cual las moléculas quirales hayan sido expuestas; de lo contrario, la radiación ultravioleta no polarizada, o incluso la linealmente polarizada, puede destruir cualquier exceso enantiomérico creado con anterioridad, y fotolisar el material que haya quedado remanente.

Una consideración que en la presente tesis se hace, es el hecho de que el proceso de racemización de los aminoácidos sobre la Tierra, para los principales aminoácidos presentes en las proteínas, se da en una escala de tiempo menor (entre 10^3 y 10^6 años), que la escala de tiempo para su degradación (cerca de 10^7 años), según lo reportado por Bailey (2000), provocando una disminución progresiva de los valores del exceso enantiomérico generados sobre los meteoritos, depositados sobre la Tierra; por lo que Bailey ha apuntado a que los α -metil aminoácidos, al no presentar un proceso de racemización significativo antes de su degradación, proveen un recurso asimétrico más estable para el mundo prebiótico.

Los trabajos de Balavoine *et al.* (1974), S. Mitchell and I. M. Dawson, *J. Chem. Soc.*, 452 (1944), K. L. Stevenson and J. K. Verdick, *Mol. Photochem.*, 1, 271 (1969) y otros más, confirman que la LPC puede inducir excesos enantioméricos con elevada pureza óptica (90%, según lo reportado experimentalmente por Balavoine), debido a que efectivamente, la LPC afecta de manera preferencial a uno de los dos enantiómeros de una molécula quiral, según el signo de la polarización y las propiedades de anisotropía de cada enantiómero, pero la irradiación constante de una fuente de LPC genera el exceso enantiomérico en estos sistemas racémicos al provocar la fotodestrucción preferencial de uno de los isómeros

ópticos, al emplear sólo un tipo de molécula quiral y una longitud de onda específica; pero el problema del DC aquí no está presente; pues éste de origina en el momento en el que se deja de considerar solamente un único tipo de molécula quiral, y se emplea un conjunto de distintas especies moleculares, como lo es un conjunto de distintos aa quirales, al mismo tiempo que se emplea un espectro de longitud de onda amplio, y no una longitud de onda específica o espectro restringido.

Cerf y Jorissen (2000) analizaron los datos disponibles del DC para aminoácidos y encontró que las bandas al rededor de los 210nm de LPC, son canceladas para el caso de las mezclas de triptófano y de prolina; concluyendo que, en el contexto que involucra la irradiación de LPC, estos dos aminoácidos no formaron parte del conjunto biogénico, y que, por el contrario, en caso de que fuera demostrado que ambos formaron parte de este conjunto de aminoácidos biogénicos, entonces el contexto de la irradiación por LPC debiera ser descartado.

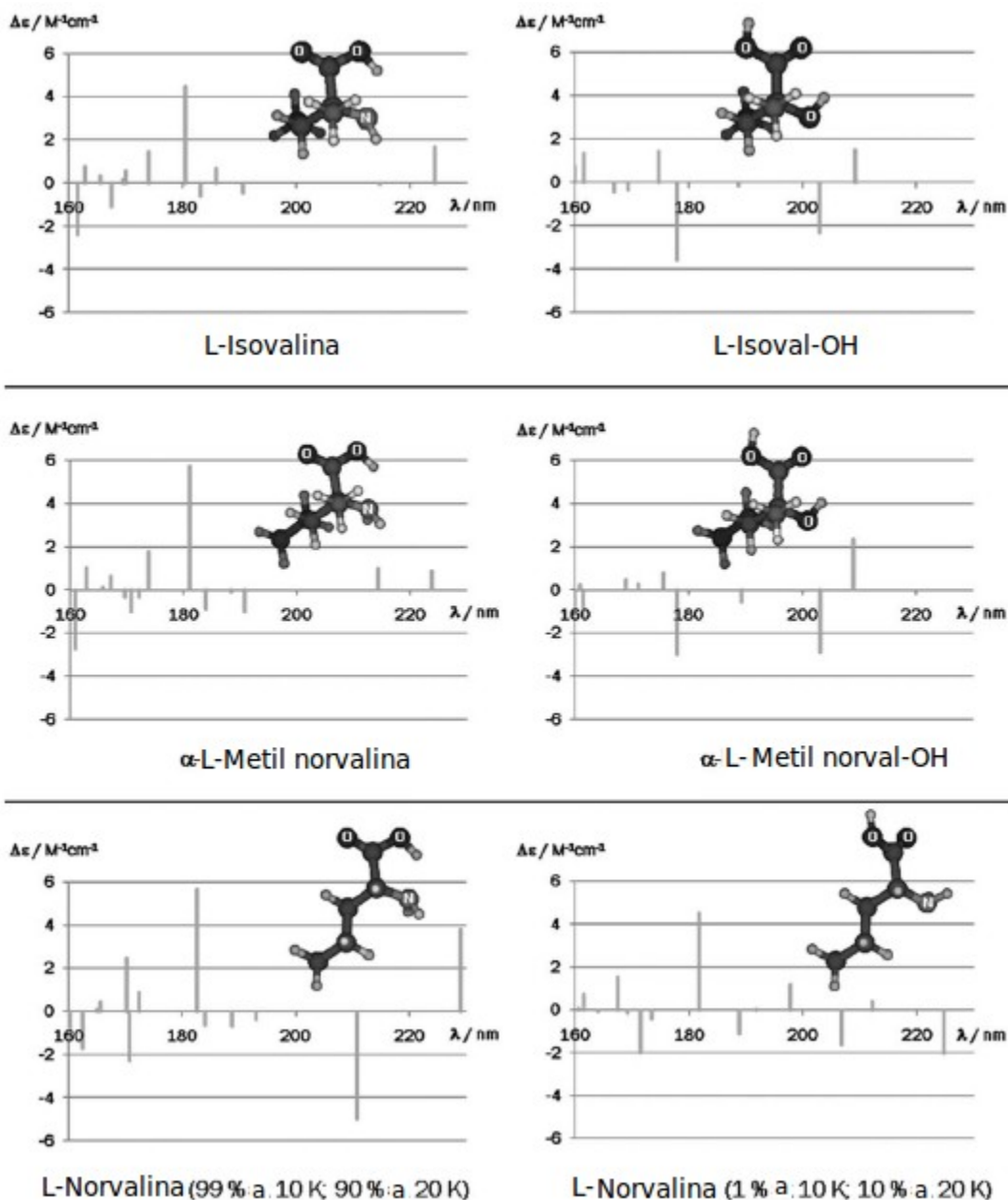
Pizzarello y Cronin (2000) apuntan que probablemente todos los aminoácidos naturales no fueron parte del conjunto biogénico, y que por el contrario, los α -metilaminoácidos tienen mayor probabilidad de haber sido los integrantes de este conjunto, gracias a su mejor resistencia a la racemización. Sin embargo, por lo que acabamos de mostrar, no sólo basta con tener un conjunto resistente a la racemización, sino además, capaz de que todos sus elementos quirales presenten el mismo signo en las bandas de absorción producidas por el DC en un intervalo de una longitud de onda amplio. De este modo, podemos pensar que es más sencillo considerar que el dicroísmo circular originó una quiralidad inicial en la ribosa, y posteriormente ésta indujo la ruptura de la simetría en los aminoácidos, validando así el mundo del RNA; pues es difícil tener un conjunto de aminoácidos donde todos muestren bandas de DC del mismo signo en un intervalo específico en la LPC. Sin embargo, los excesos enantioméricos encontrados en los meteoritos sólo han confirmado una asimetría en los aminoácidos en el MIE, y no en algún carbohidrato, como la ribosa, y los resultados presentados por Saladino *et al.* (2011), muestran que el efecto catalítico del sustrato mineral del meteorito Murchison incluye la degradación de azúcares y otros precursores de los ácidos nucleicos. Si bien tanto los aminoácidos como los azúcares pueden generar excesos enantioméricos al ser irradiados por LPC en condiciones de laboratorio, hasta ahora sólo se tiene evidencia de que este proceso puede darse de manera natural sobre los aminoácidos en el espacio exterior, y eso impide descartar la existencia de un intervalo de longitud de onda donde un conjunto de aminoácidos presenten bandas del mismo signo para el DC, aunque abordar la asimetría en los aa de meteoritos desde otra perspectiva que no dependa del dicroísmo circular y la LPC, puede ayudar a buscar una solución convincente al problema.

Un estudio desarrollado por Vandenbussche *et al.* (2011), sobre los valores del DC para distintas moléculas orgánicas identificadas en las condritas carbonáceas, les llevó a concluir que la LPC no es la causante del L-ee observado en los aa meteoríticos. En este trabajo se consideraron los aminoácidos metilados isovalina y α -metil norvalina, que han sido reportados con L-ee en los meteoritos, y sus correspondientes hidroxiácidos precursores que han sido también reportados en las condritas carbonáceas, pero en proporciones racémicas; además la norvalina, que ha sido detectada de manera racémica en la superficie de condritas carbonáceas, también fue considerada. Con estas cinco moléculas quirales, los valores del DC fueron calculados en un intervalo de 160 a 240nm, el cuál representa un

intervalo donde estas moléculas absorben luz sin ser fotolisadas, y los resultados muestran la presencia de valores con signos opuestos para cada una de estas moléculas (figura 17), donde al sumar sus valores del DC para todo el intervalo, se obtuvo el valor más alto para la L-isovalina con un valor de $5.4 \text{ Mol}^{-1}\text{cm}^{-1}$, luego la α -L-metil norvalina con $4.8 \text{ Mol}^{-1}\text{cm}^{-1}$ (ambos α -metil aminoácidos reportados con L-ee). Los valores para los L-hidroxiácidos fueron $-2.5 \text{ Mol}^{-1}\text{cm}^{-1}$ para el precursor de isovalina, y de $-3.6 \text{ Mol}^{-1}\text{cm}^{-1}$ para el precursor de la metil norvalina. Mientras que el valor mayor para L-norvalina fue de $1.5 \text{ Mol}^{-1}\text{cm}^{-1}$ (a 20K), y dado que los excesos enantioméricos reportados para los aminoácidos meteoríticos van desde 3% hasta 18% dependiendo del aa que se trate, Vandenbussche *et al.*, concluyeron que estos valores encontrados son muy bajos y fácilmente pueden ser racemizados los ee que ellos soportan; por lo que resulta difícil que la LPC en este intervalo de irradiación sea la responsable del ee observado en las condritas carbonáceas.

Otra opción es que la LPC no haya estado presente en todo este intervalo de longitud de onda, sino que, y apoyándose en sus resultados este equipo de trabajo menciona que si sólo las longitudes de onda entre 210 y 240 nm hubieran estado presentes, entonces los tres aminoácidos considerados hubieran presentado el mismo signo en las mediciones del DC, pero concluyen que esto es poco probable y que lo más probable es que el espectro de irradiación haya sido tan amplio como el usado en su estudio.

↓ **Figura 13.- Espectro del dicroísmo circular calculado para cinco moléculas detectadas en el meteorito Murchison. Modificado de Vandenbussche et al., 2011.**



Evidencias de la Presencia de Nanotubos de Carbono en el MIE

En el año de 1998, Henning y Salama citan en su artículo el reporte del grupo de trabajo de astroquímica de la división IV de la Unión Internacional Astronómica, donde mencionan que más del 75 % de las 118 moléculas circunestelares identificadas hasta ese entonces, son moléculas constituidas por carbono, y que varios de los componentes del polvo interestelar son carbonáceos. Además, dado que el carbono aporta la principal fuente de electrones libres en las nubes difusas interestelares y contribuye así al calentamiento del gas interestelar, es importante hacer notar su relativamente alta abundancia en el Universo, al ser el primer elemento, de los más ligeros de la tabla periódica, que es formado

exclusivamente en el interior de las estrellas como carbono elemental. Una vez que es producido en el interior estelar por reacciones de fusión, posteriormente es expulsado al espacio interestelar e intergaláctico durante el colapso y explosión de alguna supernova (Ehrenfreund y Cami, 2011).

Los modelos han evidenciado que las condiciones en las nubes moleculares involucran la combinación de moléculas ionizadas en fase gaseosa y en estado sólido, presentando reacciones químicas sobre la superficie de granos de polvo, de tal modo que las colisiones entre dos moléculas ionizadas es facilitada una vez que la fotoionización y la fotodisociación en las nubes difusas es causada por los rayos cósmicos en las nubes densas, estableciéndose redes de reacción química que permiten la formación de estas moléculas. Es importante hacer notar que los resultados experimentales han evidenciado que la formación de cadenas de carbono largas son fotodisociadas cuando se exponen a fotones que llevan más de 6 eV de energía, pero que los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) de elevado peso molecular son altamente fotoestables, debido a que presentan enlaces químicos con hibridación sp^2 , lo que permite la deslocalización p de sus electrones sobre el esqueleto de carbono, logrando permanecer estables en el ambiente interestelar (Henning y Salama, 1998). Esto es importante debido a que los nanotubos de carbono presentan este mismo tipo de hibridación, y de allí que nosotros asumimos en este trabajo la alta estabilidad y resistencia a la recemización por parte de los nanotubos quirales. Así mismo, como se ha descrito, los nanotubos de carbono son generados a partir de hojas laminales de grafeno, por lo que la confirmación de estos HAP sugiere la presencia de grafeno, y la presencia de fulerenos, formados a partir de éste, la confirma.

Otro componente abundante tanto en las estrellas ricas en carbono, como en las nebulosas planetarias son los silicatos (SiC), constituyendo menos del 5% del material en los granos de polvo cósmico. Estos minerales son importantes dado que sirven como puntos de nucleación para estructuras complejas; mientras que los análisis sobre meteoritos condriticos han demostrado la existencia de dos tipos de granos presolares: los nanodiamantes y las partículas de grafeno (Huss y Lewis, 1995), donde el grafeno ha sido reportado con tamaños de 1 a 20 μm y conteniendo isótopos anómalos de carbono y gases nobles. Las mediciones en estos meteoritos muestran la presencia de pequeñas esferas de carbono (fulerenos) que contienen pequeños cristales de carbido de circonio y molibdeno, las cuáles indican que posiblemente estas estructuras esféricas son formadas por procesos de nucleación heterogénea, donde los carbidos actúan como núcleos de condensación para formar estos fulerenos. Además, la presencia de querógeno en las condritas carbonáceas muestra una abundancia de deuterio (según la proporción D/H) que indica que, por lo menos una parte de este material de querógeno o sus bloques de construcción, fueron formados a través de reacciones de moléculas ionizadas en fase gaseosa dentro de las nubes moleculares, antes de que el sistema solar fuera formado (Henning y Salama, 1998). Otro resultado importante para nuestra propuesta, es que se ha reportado que las nanopartículas de carbono presentan una alta tendencia a formar aglomerados e incluso presentar coalescencia (Stognienko *et al.*, 1995). Estas nanopartículas pueden ser formadas en las regiones circunestelares de las estrellas ricas en carbono, las cuáles presentan la química del carbono más compleja, siendo análoga esta superficie a la formación de hollín en las chimeneas industriales (donde se ha reportado la formación de fulerenos y nanotubos de carbono). En las regiones circunestelares, la temperatura durante la condensación determina

la vía de formación de las partículas carbonáceas, donde los resultados experimentales muestran que a temperaturas menores a los 1700K se forman hidrocarburos aromáticos policíclicos, y en las mayores a los 3500K se forman fulerenos (Ehrenfreund y Cami, 2000).

La presencia de nanotubos de carbono en los granos de polvo del medio interestelar ha sido sugerida como una posibilidad, aún por confirmar por medio de observaciones futuras (Ehrenfreund y Foing, 2011). La formación de estos nanotubos posiblemente sea similar al de la formación de fulerenos, al rededor de ambientes circunestelares de estrellas ricas en carbono que pierden masa, y bajo la influencia de radiación fuertemente ionizante, como la liberada por una estrella de neutrones (entre 10^{43} y 10^{44} J de energía en forma de fotones, neutrinos y energía cinética); donde su tasa de degradación debe ser menor a la de síntesis, siendo a la vez estructuras altamente estables una vez formadas, como lo sugieren los datos experimentales exponiendo fulerenos a irradiación con rayos γ (Basiuk, *et al.*, 2005). Los resultados experimentales presentados por Carraro *et al.* (2010), apoyan la presencia de los fulerenos en el medio interestelar y su formación en las regiones circunestelares, del mismo modo que los reportes previos de Cataldo y Pontier-Johnson (2002). Cuando los fulerenos fueron descubiertos, en 1985 por Kroto *et al.*, se esperaban obtener formas alargadas, alotrópicas del carbono, por medio de la ablación láser del grafeno; del mismo modo que posteriormente fueron encontradas estas formas alargadas formando nanotubos, obtenidos por el calentamiento resistivo del grafito por medio de un arco eléctrico entre dos electrodos (Lijima, 1991; y Lijima e Ichihashi, 1993). De este modo, la sugerencia de la presencia de nanotubos de carbono en el medio interestelar, por medio de procesos análogos a los sugeridos para los fulerenos y los HAP, no se trata de una proposición sin fundamento, ni planteada por vez primera en este trabajo, sino se trata de una sugerencia basada en datos experimentales y observaciones de los espectros de luz captados provenientes del espacio exterior, y correspondientes a ciertas estructuras moleculares, donde las referentes a la presencia de nanotubos de carbono aún no han sido recabadas, pero muy posiblemente se espera que sean halladas.

Estos nanotubos de carbono, de ser formados en el medio circunestelar y estar presentes en el interestelar, desplegarían una diversidad amplia de formas y quiralidades, según los resultados experimentales reportados por Alekseev (2006), donde es mostrado que el crecimiento de los distintos tipos de nanotubos de carbono, sobre partículas catalíticas (por arriba de los 50 u 80 Å de diámetro), es determinado por el diámetro de estas partículas, por la temperatura, la energía presente en las interacciones de van der Waals de un átomo catalítico con un plano de grafeno, y el enlace químico entre el catalizador y los átomos de carbono. Un resultado importante es el presentado por Garvie y Buseck (2004), quienes reportan la presencia de componentes aromáticos de carbono, de tamaño nanométrico, en forma de esferas huecas y sólidas, además de algunas estructuras a manera de nanotubos en la condrita carbonácea del Lago Tagish; donde estas estructuras nanométricas, enriquecidas con deuterio, presentan un claro origen estelar.

De este modo, la búsqueda de nanotubos de carbono quirales sobre la superficie de condritas carbonáceas, permite dirigir la búsqueda del sustrato quiral propuesto aquí, hacia un tipo de macromolécula orgánica concreta. De resultar satisfactoria la búsqueda, la validez de la hipótesis presentada en esta tesis de la absorción quiroselectiva, obtendría

bases sólidas debidas a las propiedades de las superficies quirales, como aquellas compuestas por nanotubos de carbono, de inducir la absorción de cierta serie quiral de enantiómeros, así como permitir el ordenamiento espacial de las moléculas absorbidas y estabilizarlas ante perturbaciones externas.

Nanotubos Quirales de Carbono Posiblemente son Capaces de Absorber Enantioselectivamente Moléculas Orgánicas

Las superficies quirales han sido empleadas para provocar la absorción de moléculas quirales con fines industriales. Existen diversos resultados que han logrado demostrar que este tipo de interacciones se basan en enlaces no covalentes, de interacciones electrostáticas principalmente, siendo un ejemplo lo reportado por Fasel, *et al.* (2001), empleando cobre quiral como un sustrato asimétrico, y una molécula orgánica quiral, denominada heptaheliceno ($C_{30}H_{18}$). Los resultados de este estudio son representativos de las interacciones entre una superficie quiral y una molécula quiral, cuando la interacción puede provocar la absorción de la molécula: al emplear cobre quiral con orientaciones (111) y (332), lograron inducir la absorción del heptaheliceno, sólo empleando el enantiómero levógiro para el experimento de deposición sobre el Cu quiral. La absorción del enantiómero provocó la orientación específica de la molécula sobre la superficie de Cu, así como ligeros cambios espaciales como la disminución en el diámetro de la hélice y, como consecuencia, un aumento en las propiedades eléctricas del heptaheliceno; permitiendo además que la conformación de la molécula fuera optimizada tras la orientación de ésta sobre el Cu.

Los resultados obtenidos por Darányi *et al.* (2011), muestran que el óxido de titanio puede adherirse a nanotubos de carbono para formar películas con aplicaciones industriales, al darle los nanotubos al TiO_2 , soporte y consistencia espacial. La unión de nanotubos de carbono, por medio de enlaces no covalentes, a metaloporfirinas, permite el reconocimiento de éstas sobre la superficie, al ser absorbidas por el sustrato compuesto de nanotubos y la presencia de un campo eléctrico (Penza, *et al.*, 2010), lo que demuestra que la absorción de macromoléculas orgánicas, como las metaloporfirinas, también puede verificarse sobre sustratos de nanotubos de carbono.

Este tipo de resultados nos permiten establecer conclusiones generales acerca de las interacciones entre sustratos asimétricos y moléculas quirales: primero, que las interacciones pueden dar origen a la absorción de ciertos enantiómeros sobre la superficie asimétrica, si las condiciones son adecuadas; segundo, que estas superficies asimétricas pueden servir de superficies para la condensación o adhesión de moléculas orgánicas con una asimetría quiral provocada por el sustrato; tercero, que sobre la base de estas propiedades y de absorción, las superficies quirales pueden servir como selectores asimétricos, y muy posiblemente como separadoras de mezclas racémicas y de absorción de proteínas; cuarto, que la absorción asimétrica entre la superficie y el enantiómero se da por complementación estereoquímica, es decir, la superficie quiral absorbe enantiómeros de quiralidad opuesta a ella; quinto, que la absorción provoca en la molécula una orientación espacial sobre el sustrato, definida por las propiedades de la molécula y el grado de quiralidad del sustrato; y sexto, que la absorción provoca en la estructura interna de la molécula un rearrreglo conformacional geométrico, determinado por la conformación

original de la molécula y el grado de quiralidad del sustrato y la intensidad de la interacción.

La RES sobre mezclas racémicas de moléculas quirales, producto de la influencia de un sustrato asimétrico aún no ha sido reportada, sin embargo, las interacciones no covalentes entre moléculas de importancia biológica, como el DNA (figura 14) y proteínas, con los nanotubos de carbono sí han sido reportadas, donde Gao y Kong (2004) desarrollaron una simulación por computadora entre el DNA y nanotubos de carbono, basándose en esta serie de datos. Este modelo permite sacar dos conclusiones: la primera, que el medio acuoso para las interacciones no covalentes entre moléculas de importancia biológica y los nanotubos de carbono es importante para que sean establecidas; y la segunda, que estas interacciones no covalentes son debidas a fuerzas de van der Waals. De este modelo también se desprende el hecho de que las interacciones entre DNA y nanotubos de carbono, dependiendo del diámetro de éstos, pueden darse al interior del nanotubo, confinando las moléculas de DNA a un espacio unidimensional. Las propiedades electrónicas de los nanotubos de carbono son sensibles a la transferencia de cargas sobre su superficie y a cambios en el medio electrostático circundante, de tal modo que pueden ser capaces de interactuar con varias moléculas o complejos moleculares, ya sea sobre su superficie externa o en su interior; y dado que en la presente tesis nos hemos centrado en las interacciones entre aminoácidos y la superficie externa de los nanotubos (quirales) de carbono, sólo este tipo de interacciones son consideradas aquí.

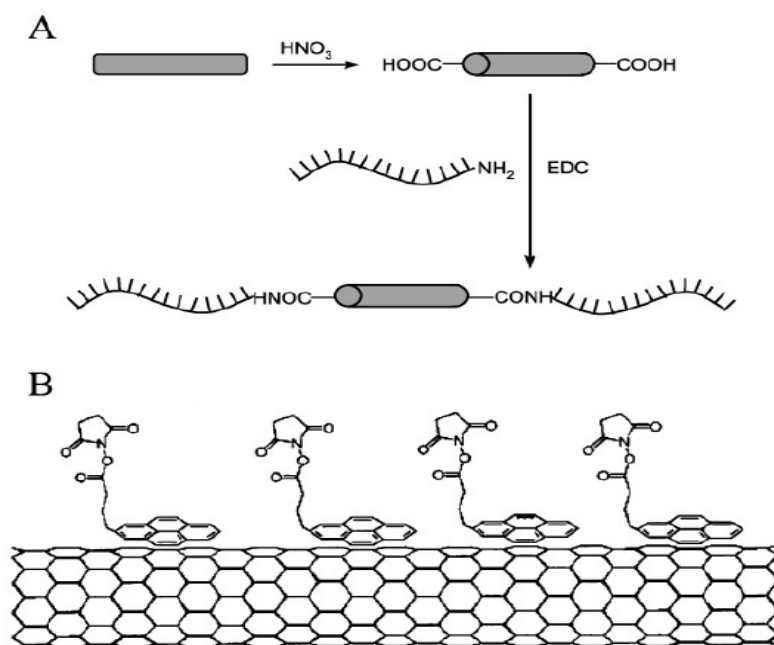


Figura 14.- Interacciones no covalentes entre DNA y nanotubos de carbono. Se presentan los tipos de interacción que los nanotubos de carbono de pared sencilla pueden inducir sobre el DNA. En A, se muestra el tipo de interacción dada por el confinamiento de hebras sencillas de DNA en el interior del nanotubo. En B, se presenta la adsorción de las bases nitrogenadas sobre la superficie externa del nanotubo. Nótese que las bases nitrogenadas adquieren todas una orientación espacial consistente a lo largo de todo el nanotubo. Tomado de Gao y Kong, 2004.

Dado que los nanotubos de carbono son químicamente inertes, deben sufrir modificaciones químicas para que puedan establecer interacciones no covalentes con otras moléculas (Gao y Kong 2004). Las modificaciones hídricas sobre la superficie de las condritas carbonáceas demuestran que reacciones químicas en medio acuoso, sobre la superficie de estos meteoritos, son desarrolladas en el espacio interestelar (Pizzarello 2007); pudiendo

considerar a estas modificaciones hídras como posibles detonantes de interacciones entre los aminoácidos y los posibles nanotubos quirales de carbono putativamente adheridos a la superficie meteorítica. El modelo matemático de polimerización propuesto por Gleiser y Walker (2008), obtuvo resultados de una ruptura de la simetría quiral, prescindiendo por completo de las fotorreacciones enantioselectivas producidas por la LPC, y basándose en suponer la existencia de un sustrato autogénico, capaz de generar por sí mismo los monómeros quirales durante un proceso de polimerización, ya sea de aminoácidos o de azúcares, por medio de una dinámica similar a la reacción de Soai (ver anexo 3). Con una idea similar a la de la presente tesis, donde se considera un sustrato quiral como la fuente de asimetría necesaria para inducir la RES sobre una mezcla racémica por medio de la absorción quiroselectiva, los resultados logrados por Gleiser y Walker, basados en una serie de modelos matemáticos previos, refuerzan la posibilidad de que la RES en mezclas racémicas de moléculas potencialmente biogénicas, y dentro de un contexto prebiótico, sea inducida por la presencia de sustratos y no así por la irradiación de LPC sobre el sistema.

La demostración de que el sustrato mineral del meteorito Murchison presenta una actividad catalítica, al emplear formamida bajo el supuesto de tener relevancia en la química prebiótica al estar presente en los meteoritos y sus cuerpos parentales (Saladino *et al.*, 2011), puede ser contextualizada dentro del presente trabajo, pues su primer conclusión de ser la parte mineral del meteorito Murchison la que presenta actividad catalítica, y no la parte orgánica, permite suponer con mayor certidumbre que dicha fracción orgánica macromolecular, al ser químicamente inerte, del mismo modo que los nanotubos de carbono, en efecto se trata de éstos, cuyo papel por nosotros propuesto en el escenario prebiótico no es el de catalizadores, sino el de una superficie capaz de interactuar con las moléculas orgánicas meteoríticas, induciendo sobre ellas una ruptura espontánea de la simetría, debida a su propia asimetría quiral. La segunda conclusión de dicho grupo de trabajo de que un sistema biogénico originado inicialmente por polímeros de RNA, debió de haber prescindido de la condición homoquiral, da soporte a nuestra proposición de considerar los aminoácidos como el primer sistema asimétrico al ser éstos hallados con excesos L-ee, posiblemente, desarrollados por las interacciones heterogéneas no covalentes con el sustrato asimétrico de nanotubos de carbono meteoríticos, capaces posiblemente de ser el primer paso a la condición homoquiral y el establecimiento de redes de interacción que posiblemente soportaron la emergencia de la dinámica biológica. Esto último, además de la asimetría de los L-aminoácidos y del componente orgánico macromolecular R en el Murchison, son las evidencias experimentales que soportan nuestra hipótesis teórica.

De este modo, teniendo como base la evidencia e ideas presentadas hasta aquí, se hace evidente que, siendo la presente tesis una propuesta teórica original, los datos aún por recabar son mucho más numerosos que los presentados aquí, pero estos últimos, discutidos dentro de nuestra hipótesis, la soportan como una propuesta viable a ser probada experimentalmente, donde la búsqueda de nanotubos quirales de carbono adheridos sobre la superficie de las condritas carbonáceas, se hace imprescindible para la confirmación (o rechazo) de la hipótesis planteada para el desarrollo de este trabajo. La búsqueda directa de los nanotubos sobre las superficies meteoríticas es la vía inmediata y más directa para someter a prueba nuestra idea, donde un método sencillo que proponemos es la observación directa de muestras de la superficie de condritas carbonáceas (ver más adelante, en “propuesta de protocolo 1”), por medio del empleo del Microscopio de Fuerza Atómica, al

considerarlo la herramienta adecuada para esta primera búsqueda y prueba de nuestra hipótesis.

Nuestra Propuesta

No está de más aclarar, como ya se ha hecho con anterioridad, que el basar el origen de la quiralidad en aa meteoríticos en la existencia de un sustrato quiral, conformado por nanotubos de carbono con un D-ee, no es solamente recorrer el problema de un punto a otro dentro de una secuencia “lineal” de acontecimientos, pues nada impide considerar ambos procesos como separados, a la vez que frecuentes, vinculándose a manera de coyunturas históricas en el Universo, verificables en la superficie de meteoritos y posiblemente en sus cuerpos parentales (asteroides y polvo interestelar). Por lo que la creación del sustrato quiral, al encontrar puntos de coincidencia con los procesos de síntesis abiótica de aa, y verificarse estos eventos sobre las superficies meteoríticas, bien puede significar la contingencia entre ambos procesos que origina la asimetría en los α -metil aminoácidos.

Es también medular aclarar que en esta propuesta partimos de un medio aquiral, como la presencia de gases en reacción (como la reacción de Strecker, ver anexo 4), que al reaccionar y condensar sobre la superficie quiral, sus productos moleculares como los aminoácidos, son sintetizados de manera asimétrica. Este supuesto nos permite evitar el problema de la segunda ley de la termodinámica, donde la ruptura de la simetría no es generada a partir de un sistema equilibrado ganando orden y reduciendo la entropía, sino que se genera de un sistema aquiral (y equilibrado), donde las condiciones existentes (la superficie de nanotubos quirales), le impiden mantener una condición racémica al hacerse quiral, como sucede durante la síntesis abiótica de aminoácidos.

Recientemente ha sido reportada la capacidad catalítica de los componentes minerales del meteorito Murchison (Saladino *et al.*, 2011), donde este efecto tanto de síntesis como de degradación de precursores del RNA ha demostrado ser capaz de inducir la condensación de la formamida, para sintetizar ácidos carboxílicos, aminoácidos, nucleobases y precursores de azúcares; además de presentar un bajo efecto hidrolítico sobre cadenas de 24 monómeros de longitud de RNA, dentro de un intervalo de pH de 4.2 a 9.3, a 80°C. Sin embargo, este efecto catalítico no presenta ningún tipo de asimetría ni preferencia enantiomérica en los productos de la catálisis: es aquiral; y para que este escenario sea viable en un contexto prebiótico, se requiere necesariamente (según lo que hemos venido argumentando y seguiremos haciendo) la existencia de una superficie quiral (o cualquier fuente de asimetría) que induzca la RES sobre moléculas potencialmente biogénicas.

La propuesta en la presente tesis es que ante la existencia de un sustrato quiral, capaz de establecer interacciones no covalentes con moléculas orgánicas presentes sobre su superficie, pudiendo estar éstas en medio acuoso o en fase gaseosa condensando sobre la superficie quiral, la absorción preferencial de uno de los enantiómeros con respecto a su antípoda puede ser establecida induciendo una RES sobre la superficie del sustrato quiral. En este proceso aquí propuesto se considera la absorción como un fenómeno de interacción electrostática, no la catálisis inducida por la superficie quiral y su consecuente síntesis o degradación asimétrica de moléculas orgánicas, por lo que la falta de actividad catalítica en la fracción orgánica de la condrita Murchison, no invalida nuestra propuesta.

Siendo una conclusión a la cual llega el trabajo de Saladino *et al.* (2011), la parte mineral, y no la orgánica en las muestras del meteorito Murchison, es la que presenta la actividad catalítica; por lo que esta última, de demostrarse que presenta una asimetría como inicialmente nos sugiere el estudio de Kawasaki, *et al.* (2006), bien puede ser considerada como la fuente de asimetría para inducir la RES en aa meteoríticos.

Adicionalmente a las reacciones aquirales de condensación sobre la putativa superficie quiral asimétrica, una fuente de energía actuando sobre el sistema sustrato-molécula quiral puede ser necesaria para inducir la interacción y el dinamismo entre los elementos de dicho sistema.

Con base en esto, la radiación con luz ionizante puede generar partículas cargadas eléctricamente, que se mantengan en interacción con la superficie quiral, y que interactúen con otras partículas a las cuales se les puede poner en movimiento sobre dicha superficie o canal. Podemos así sugerir un contexto asimétrico, basándonos en lo que sugiere el modelo matemático desarrollado por Aldana *et al.* (1998, 2003), Martínez-Mekler *et al.* (1999; figura 15), donde una interacción entre un polímero a guisa de canal unidimensional y una partícula cargada, es inducida por medio la radiación ionizante. Este escenario nos permite obtener un sistema asimétrico relativamente estable, dado que un problema no abordado hasta ahora en este trabajo es que existe una tendencia espontánea a regresar a un estado equilibrado en las concentraciones de los enantiómeros y perder así el orden ganado durante la adquisición de la actividad óptica (el fenómeno de la racemización), tenemos que si la LPC genera un exceso enantiomérico de L-aminoácidos, éste desequilibrio tiende a desaparecer conforme la fuente de LPC se aleja del sistema (o el sistema, como lo es un meteorito, se aleja de la fuente de LPC). Este problema puede ser resuelto si se considera la idea aún intuitiva de la presencia de nanotubos quirales de carbono en el MI y en los meteoritos (como el Allende, Murchison y Murray) que puedan, además de inducir, estabilizar una RES sobre los aa al proporcionar un sustrato sobre el cual interaccionan, formando canales como se proponen en el modelo matemático. De este modo, la presencia de una superficie orgánica quiral puede ser capaz de permitir la formación de polímeros homoquirales o con una alta pureza enantiomérica, sobre los cuales puedan ser desarrolladas paralelamente ciertas propiedades dinámicas capaces de soportar una estructura y comportamiento característicos para dar paso a los sistemas biológicos (ver propuesta 2 de esta tesis), además de evitar las contradicciones causadas por los valores del dicroísmo circular.

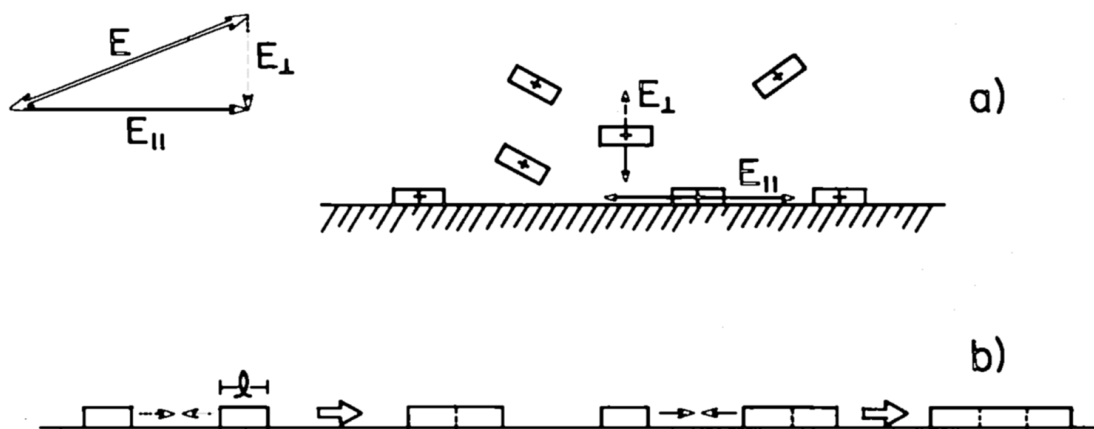


Figura 15.- Dinámica propuesta para la interacción de monómeros (pudiendo tratarse de aminoácidos), al inducir una absorción sobre una superficie, al irradiar el sistema con radiación ionizante: (a) representación diagramática de los monómeros ionizados siendo absorbidos sobre la superficie de un canal (pudiendo ser éste un nanotubo quiral de carbono). La radiación electromagnética presenta un componente transversal E_{\perp} que produce una agitación perpendicular a la superficie, favoreciendo tanto la absorción como la evaporación. (b) una vez que un monómero es absorbido, el componente paralelo de la radiación electromagnética E_{\parallel} induce un movimiento oscilatorio de los monómeros a lo largo de toda la superficie del canal, que favorece la polimerización. *Modificado de Martínez-Mekler et al., 1999.*

Como se ha remarcado, si bien podría pensarse que este escenario no resuelve el problema del origen de la quiralidad en los sistemas vivos, sino que sólo lo traslada a una etapa anterior al inicio de la actividad óptica en las moléculas biogénicas al considerar la existencia de un sustrato asimétrico, esto sólo es en apariencia, pues en primer lugar tenemos que si un agente asimétrico es capaz de inducir también una asimetría en los componentes moleculares potencialmente biogénicos (como los aminoácidos), el inicio de la quiralidad biológica puede ser identificado en este punto donde convergen ambos fenómenos: la síntesis abiótica (y aquiral) de moléculas biogénicas y la asimetría de un agente quiral; pudiendo rastrear y comprender el origen de la quiralidad en el agente que indujo la asimetría en el sistema biogénico, para tener una mejor comprensión del proceso involucrado en el origen de la vida, pero pudiendo concluir que la homoquiralidad biológica es consecuencia de procesos convergentes en el Universo. Si estos procesos asimétricos dan paso a un agente quiral que influya en la síntesis de moléculas biogénicas, el que este agente se trate de una superficie quiral, de LPC, de diferencias de energía en la violación de la paridad u oscilaciones estadísticas en mezclas racémicas, constituye el vínculo que marca la continuidad de los procesos universales en los sistemas vivos.

En segundo lugar, tenemos que si los mecanismos tomados como los más probables para inducir la asimetría observada en los aa de meteoritos, fallan en el momento de vincularlos de manera directa con la asimetría de estos aminoácidos, quizá puede ser debido a que formen parte de procesos independientes, que concurren en los sistemas biogénicos dentro de una dinámica que involucra algún paso intermedio. De este modo, la creación de un sustrato asimétrico puede formar parte de un proceso independiente pero concurrente en el origen de la vida, presente en las regiones circunestelares donde los fuertes campos magnéticos quirales, así como la LPC emitida por estrellas masivas (estrellas de neutrones,

por ejemplo), representan una fuente de asimetría no poco frecuente, y que puede influir en la formación de nanotubos de carbono en sus inmediaciones. Mientras tanto, la química del carbono, ampliamente extendida en el medio interestelar, al originar moléculas potencialmente biogénicas (como los aa) por vías diversas, constituye un fenómeno también frecuente. Ambos procesos, cada uno independiente al mismo tiempo que frecuentes en el Universo, pueden converger en diversos escenarios estelares e interestelares, como en la superficie de asteroides, considerados como los cuerpos parentales de los meteoritos y, por lo tanto, sobre la superficie de estos últimos. Por lo tanto, nuevamente podemos afirmar que el punto de inicio de la quiralidad biológica se encuentra en el punto de intersección (no poco frecuente ni poco probable) de ambos procesos en el Universo. Lo que refuerza la idea de que la vida es una consecuencia de la evolución y complejización de la materia en el Universo, tras la interacción y convergencia de diversos procesos y moléculas producidas por vías diversas.

Los nanotubos quirales de carbono, posiblemente formados en las regiones circunestelares de estrellas de neutrones, pueden encontrarse sujetos a una fuente de asimetría dada por la LPC o por la dirección en el campo magnético de la estrella, lo que representa una fuente de asimetría con la que son creados. Estos nanotubos de carbono quirales, con un ligero exceso enantiomérico (en este caso un D-ee), adheridos a granos polvo interestelar, y pudiendo éstos conformar asteroides y demás cuerpos, son capaces de permanecer sobre la superficie de meteoritos condriticos para constituir superficies carbonáceas asimétricas, y presentar un comportamiento similar al de las superficies quirales desarrolladas en los laboratorios (aunque indudablemente con una pureza quiral mucho menor), absorbiendo moléculas quirales sintetizadas de un medio aquiral, o incluso siendo una superficie que influencia de manera asimétrica dicha síntesis (figura 16).

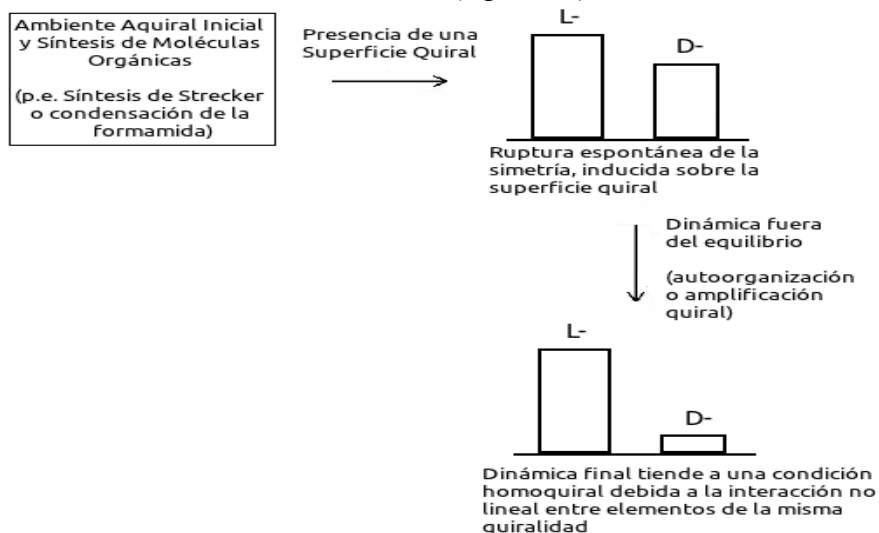


Figura 16.- Propuesta general para explicar el origen de la quiralidad biológica, considerando la absorción quiroselectiva de L-aminoácidos sobre una superficie de nanotubos de carbono quirales, de configuración R. Presentamos nuestro planteamiento teórico por medio del cual puede llegarse a la condición homoquiral actual en los sistemas vivos terrestres. Como ya se ha explicado en el desarrollo teórico de nuestra propuesta, la dinámica alejada del equilibrio entre moléculas de la misma quiralidad permite una dinámica no lineal que hace posible la autoorganización de la materia, para soportar propiedades emergentes tan novedosas como la dinámica biológica.

Propuesta de Protocolo

BÚSQUEDA DE NANOTUBOS DE CARBONO QUIRALES SOBRE SUPERFICIES METEORÍTICAS, EMPLEANDO EL MICROSCOPIO DE FUERZA ATÓMICA.

Con base en lo anteriormente planteado en la presente tesis, la búsqueda de nanotubos quirales en el Material Orgánico Insoluble (MOI) de las muestras de condritas carbonáceas, empleadas para las determinaciones reportadas por Kawasaki *et al.*, (2006), representa una vía directa para someter a prueba la hipótesis propuesta de la existencia de nanotubos quirales sobre la superficie de estos meteoritos, que puedan inducir la ruptura espontánea de la simetría en mezclas racémicas de aminoácidos meteoríticos.

De este modo, la observación por medio del microscopio de fuerza atómica (MFA) de las muestras del MOI de los meteoritos Murchison, Murray y Allende, permitiría una primera aproximación para identificar si existe o no esta superficie quiral basada en nanotubos de carbono. Las observaciones pueden ser desarrolladas de manera directa empleando muestras sólidas de la superficie de los meteoritos, al ser necesarias muestras sólidas para el MFA. Una ventaja de estas observaciones es que no se requiere de una preparación previa de la muestra, sólo que tenga un tamaño pequeño para montarse en el muelle del microscopio de fuerza atómica y una superficie lo más regular posible sobre la cuál se desplace la punta del microscopio.

Dado que la asimetría reportada por Kawasaki *et. al.*, (2006), empleó muestras de este MOI, puede buscarse el conseguir las muestras utilizadas en este estudio y realizar las observaciones con el MFA sobre ellas, una vez que se ha obtenido el material orgánico de manera solida por medio de centrifugación, pues las determinaciones reportadas por este grupo de trabajo se realizaron tras la extracción con solventes orgánicos sobre las muestras de los meteoritos. Estas primeras observaciones darían una evidencia directa de la validez (o invalidez) de nuestra hipótesis.

Para efectuar estas observaciones inmediatas, pueden presentarse uno o ambos de los siguientes casos: i) que ninguna de las muestras de los meteoritos Murchison, Murray y Allende sean accesibles (por el motivo que sea) para realizar las observaciones; y ii) que a menos que quede claramente demostrado que no existe superficie quiral alguna sobre la superficie de los meteoritos, si se confirmara la presencia de una superficie quiral sobre las muestras observadas, esto no representa la demostración de nuestra hipótesis, pues esto sólo mostraría la presencia de un sustrato quiral, pero no demuestra su posible interacción con una mezcla racémica de aminoácidos ni que pueda inducir una ruptura espontánea de la simetría de éstos, sobre su superficie; y pese a esto, el hallar nanotubos quirales de carbono, y hacerlo con un exceso D-enantiomérico en el mejor de los casos, representaría una fuerte evidencia de la validez de nuestra hipótesis.

De este modo, y siendo necesaria esta primera búsqueda de nanotubos quirales de carbono, se plantea el siguiente protocolo para realizar las observaciones con el MFA sobre muestras de condritas carbonáceas:

1.- Hipótesis Experimental.

Si la ruptura espontánea de la simetría en mezclas racémicas de aminoácidos puede ser inducida por la acción de una superficie orgánica quiral, capaz de interactuar electrostáticamente con estas moléculas de importancia biológica; entonces la confirmación de la presencia de una superficie de nanotubos quirales de carbono podrá servir para iniciar la prueba de que un sustrato asimétrico puede establecer el reconocimiento e interacción de aminoácidos de quiralidad opuesta a la del sustrato, debido a restricciones en la complementación estereoquímica. Lo anterior hace necesaria la búsqueda de estos nanotubos quirales, mediante la observación directa de las superficies meteoríticas empleando el MFA.

2.- Objetivos.

- i) Identificar la presencia de nanotubos quirales mediante la observación de muestras de la superficie de meteoritos condritas carbonáceas, y/o de la observación de muestras sólidas de la fracción orgánica insoluble obtenidas y empleadas en los experimentos de Kawasaki *et al.* (2006).
- ii) Identificar la existencia de un posible exceso enantiomérico sobre estos nanotubos quirales de carbono, a favor de la configuración D (equivalente a la configuración R).

3.- Materiales y Método.

3. 1. Obtención de las muestras para montar en el MFA.

3. 1. 1. Superficie de meteoritos: Contando con muestras de los meteoritos Murchison, Allende y Murray, cuidadosamente se realizarán cortes delgados paralelos a la superficie, y posteriormente cortes paralelos a los primeros, y entre sí; de manera que no sólo se restringirá la búsqueda de nanotubos quirales de carbono a la superficie externa de los meteoritos. Los cortes se realizarán de 1mm de espesor, de los cuáles se obtendrán cuadrados de 1cm x 1cm, siendo esta medida arbitraria para realizar las observaciones. Una vez contando con las muestras, se montarán en el muelle para realizar la observación con el MFA, donde se propone la observación en modo de contacto, pues permite un escaneo óptimo de la superficie de la muestra sin ser una técnica destructiva.

3. 1. 2. Fracción orgánica insoluble: Los reportes del trabajo de Kawasaki *et al.*, muestran la presencia de un ee en un componente orgánico macromolecular con quiralidad R, de tal manera que es aquí donde proponemos que se trata de nanotubos quirales de carbono. Esta fracción orgánica insoluble puede ser obtenida por los mismos métodos de separación empleados por este grupo de trabajo, y después de eliminada la fase mineral, puede obtenerse por centrifugación este componente macromolecular. En términos ideales, la obtención del componente macromolecular insoluble de las muestras de los tres meteoritos condriticos se buscará hacerse a partir de las muestras empleadas por Kawasaki *et al.*, dado que sobre estas muestras se reportó la existencia del exceso R-enantiomérico. Una vez contando con el precipitado conteniendo el componente orgánico insoluble, ya sea de las muestras de Kawasaki *et al.*, o de muestras nuevas tomadas de las condritas carbonáceas,

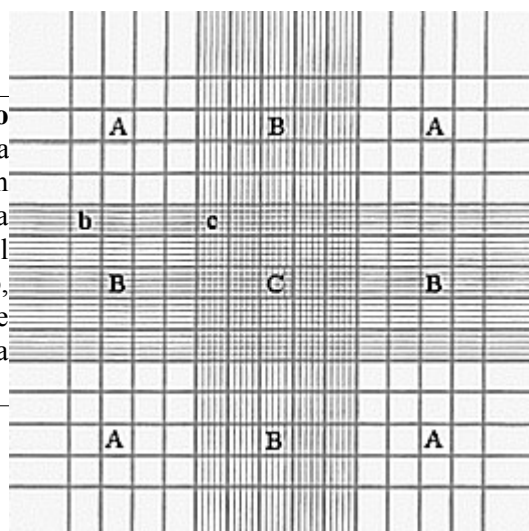
será depositado sobre un soporte metálico (una placa de 1cm x 1cm), y se dejará secar a temperatura ambiente durante un día para permitir que los posibles nanotubos precipiten en su totalidad, y poder realizar un estimado más cercano al valor real de la presencia de nanotubos quirales, cubriendo la muestra para evitar contaminación externa. Posteriormente se colocará la muestra en el muelle del MFA, para realizar las observaciones en modo contacto. Para facilitar los cálculos, se tomarán muestras de un volumen constante de los meteoritos, y a partir de éstas se obtendrá la fracción orgánica insoluble; pudiendo determinar la densidad de nanotubos quirales de carbono, posiblemente encontrados en cada muestra.

3. 2. Observaciones empleando el MFA.

Con las muestras montadas en el MFA, se realizarán las observaciones en modo contacto, pues como ya se mencionó, este modo permite un óptimo escaneo de la superficie de la muestra y representa una técnica no invasiva. Las observaciones, ya sea de las muestras directas de los meteoritos o sus fracciones orgánicas insolubles, se realizarán inicialmente de un modo aleatorio, buscando identificar una primera distribución de los posibles nanotubos de carbono y haciendo una primera descripción de las muestras.

De no ser encontrada una buena distribución de nanotubos de carbono, es decir, en caso de que exista una distribución heterogénea de éstos, se buscarán las regiones con mayor densidad de nanotubos de carbono para la búsqueda de un posible exceso enantiomérico. Si se presentara una distribución más o menos homogénea de nanotubos de carbono, las observaciones se dividirán en cuadrantes, y la determinación de nanotubos quirales de carbono se realizará del mismo modo que los conteos celulares que emplean hemocitómetros (cámaras de Neubauer, figura 17), utilizando en este caso la pantalla de la computadora para dividirla en cuadrantes (empleando un acetato o algún plástico para marcar los cuadrantes sobre el monitor). Los posibles excesos enantioméricos serán determinados para cada cuadrante y extrapolados a la muestra total, nuevamente de manera análoga a los conteos celulares con el hemocitómetro.

Figura 17.- Cuadrantes empleados en el conteo celular empleando hemocitómetros. Se presenta la división del campo observado al emplear un hemocitómetro en el conteo celular. Esta misma división en el plano es propuesta para efectuar el conteo de los nanotubos quirales de carbono, posiblemente encontrados sobre la superficie de condritas carbonáceas. Las letras en la cuadrícula indican los cuadrantes.



En el caso de una distribución heterogénea de los posibles nanotubos quirales de carbono, en las regiones donde sean encontrados éstos se empleará la misma división en cuadrantes y, usando las mismas escalas que en el caso descrito para una distribución homogénea, se determinará el posible ee por cuadrante y se calculará el área de distribución de las regiones con nanotubos quirales de carbono sobre la muestra y se extrapolarán los datos del posible ee a la superficie meteorítica.

Un problema a resolver es el conteo de nanotubos de carbono, al ser éstos fibras de diversas longitudes y no unidades más o menos determinadas espacialmente (como las células). Una primera propuesta hecha aquí es la de tratarlos como vectores: aprovechando la división en cuadrantes realizada en el monitor, un espacio euclidiano es creado, y las fibras de nanotubos de carbono quirales pueden ser representadas de forma vectorial, y los excesos enantioméricos pueden ser obtenidos mediante la suma y resta de estos vectores. De este modo, siendo la fórmula matemática para calcular excesos enantioméricos:

$$ee = |R-S / R+S|$$

Siendo R y S los enantiómeros *rectus* (derecho, en latín) y *sinister* (izquierdo en latín), podemos reescribirla en forma de vectores:

$$ee = |\sum_{i=1}^n (R^{\rightarrow}_i - S^{\rightarrow}_i / R^{\rightarrow}_i + S^{\rightarrow}_i)|$$

Donde R^{\rightarrow}_i y S^{\rightarrow}_i representan cada uno de los i-ésimos nanotubos quirales de carbono R o S, expresados como vectores. Es decir, la manera en cómo se calculará el ee por cuadrante está dada por la suma de todos los nanotubos de carbono R dentro de ese cuadrante, que dará un vector R^{\rightarrow}_i , análogamente se obtendrá S^{\rightarrow}_i , y se realizarán las operaciones correspondientes a la fórmula. Para efectuar la división entre vectores, se realizará como si fueran números complejos, tratando la división de los vectores como el producto en los números complejos: $ww' = rr'(\cos[s + s'] , \text{sen}[s + s'])$, donde w y w' son dos números complejos de módulo r y r' (la longitud del vector) y de argumento s y s' (el arco de circunferencia que abre cada vector).

4.- Posible Análisis y Resultados Esperados.

Una vez calculando el exceso enantiomérico para cada cuadrante, al estar dividida la muestra del mismo modo que un hemocitómetro, cada cuadrante medido representará uno de nueve cuadrantes contenidos en uno mayor; éstos a su vez representarán uno de nueve cuadrantes mayores en que se dividió la pantalla (la región de la muestra observada). Cada cuadrante mayor arrojará una estimación del exceso enantiomérico basada en la medición del ee en cinco de sus cuadrantes internos, del mismo modo que los conteos celulares en los hemocítopos, pero solamente considerando la distribución en el plano, y no en el espacio como lo hacen los conteos con el hemocitómetro. La región de la muestra (o la muestra en su totalidad, de ser posible), analizada así, podrá arrojar un estimado del ee local que nos permitirá estimar el ee presente en la superficie total de los meteoritos, y poder decir si esta asimetría se distribuye de manera homogénea o heterogénea en la fracción orgánica insoluble de las condritas carbonáceas.

La fórmula para calcular el ee para cada cuadrante, de la manera propuesta aquí, nos da un número complejo, cuya interpretación geométrica nos da un vector en R^2 , en forma polar. Si no existe un ee, el módulo del vector (su longitud) será de cero. La manera de operar productos de vectores como números complejos nos da un vector multiplicado por el producto de los módulos de cada vector. La fórmula original sólo arroja valores entre 0 y 1, donde 1 representa la condición homoquiral; de tal modo que en la fórmula reescrita del modo aquí propuesto nos dará un vector cuyo módulo se encontrará entre 0 y 1, pues la división entre los módulos puede escribirse como un producto del módulo del vector que se encuentra como numerador por el inverso del módulo del vector que se encuentra como denominador, definiendo así la condición racémica y homoquiral en estos extremos; pudiendo calcular además el argumento del vector (el arco de circunferencia que abre) para tener formalidad en el análisis, sin embargo el valor que nos es de interés es solamente el módulo del vector polar resultante de la fórmula.

Cada exceso enantiomérico calculado para cada cuadrante se espera, en términos ideales, que presente una asimetría quiral en favor de la configuración R, definiendo así R-ee para cada cuadrante mayor y, en total, R-ee para toda la superficie analizada y en general para la muestra y a su vez para la superficie meteorítica en su conjunto. De presentarse nanotubos de carbono con D-ee y L-ee para distintos cuadrantes interiores tras emplear la fórmula vectorial propuesta, entonces se tratará cada valor del módulo del vector calculado para estimar el ee en el cuadrante mayor con la fórmula original para calcular el ee, tomando estos módulos como valores para cada enantiómero R o S (no ya como vectores). Si además se presentaran nanotubos aquirales de carbono, se establecerá la proporción de quirales y aquirales para poder contrastar los ee con la condición racémica. Este contraste se establecerá del mismo modo que el calculado para el ee, pero utilizando la suma de nanotubos quirales (tanto R como S) y la suma de los nanotubos aquirales:

$$\text{asimetría} = |\sum_{i=1}^n (NQ_i^- - NA_i^- / NQ_i^- + NA_i^-)|$$

Donde NQ_i^- y NA_i^- representan la suma de los i nanotubos quirales y la de los i nanotubos aquirales respectivamente, vistos como vectores cada uno.

De este modo, tras la estimación del ee en las muestras analizadas esperamos obtener valores mayores que cero para la mayoría o la totalidad de las observaciones hechas, a favor de la configuración R en los nanotubos quirales de carbono. Los valores de R-ee calculados esperamos se encuentren de acuerdo con los datos reportados por Kawasaki *et al.*, para sus cálculos de R-ee para la fracción inorgánica insoluble de los meteoritos Murchison, Murray y Allende. A su vez, esperamos que la proporción de nanotubos quirales con respecto a la de nanotubos aquirales sea mayor que el 50%.

5.- Posibles Interpretaciones.

El encontrar nanotubos quirales en la superficie de las condritas carbonáceas, y/o en su fracción orgánica insoluble, nos permitirá comenzar a validar como una posibilidad real esta hipótesis planteada en este trabajo. Si además de confirmarse la presencia de nanotubos quirales de carbono, nuestros datos, tras el análisis de las observaciones, arrojan R-ee por arriba del 80%, como lo reportado por Kawasaki *et al.*, y además la proporción de

nanotubos quirales de carbono supera la de nanotubos aquirales, nuestra hipótesis puede comenzar a considerarse como cierta, faltando como último paso la demostración experimental de que una superficie asimétrica, y en particular una constituida por nanotubos quirales de carbono, puede inducir la ruptura espontánea de la simetría en mezclas racémicas de aminoácidos.

De este modo, se estaría muy posiblemente resolviendo el problema del origen de la quiralidad en un contexto del espacio interestelar. Problema que nosotros asumimos estrechamente relacionado con el origen de la vida como un proceso previo y necesario para que ésta pueda darse en planetas como la Tierra; faltando por resolver los problemas del origen de la vida desprendidos a partir de este aporte extraterrestre del exceso L-enantiomérico de aminoácidos de meteoritos: definir los elementos mínimos que un sistema debiera tener para ser considerado como vivo, donde la condición homoquiral juega un papel fundamental, según nuestra segunda propuesta teórica que a continuación se presenta.

*

V. II. PROPUESTA 2: La condición homoquiral en los péptidos y ácidos nucleicos, les confiere a estos polímeros la capacidad de almacenar información para soportar la emergencia de un sistema biogénico.

Panorama General

Como un aporte al debate sobre si el inicio de la condición homoquiral en los sistemas biológicos, un inicial exceso enantiomérico provocado por algún evento que produjo una RES sobre un sistema, es un evento previo o posterior al origen de la vida, proponemos esta segunda hipótesis donde aportamos evidencia y un argumento a ser considerado seriamente por medio del cuál la condición homoquiral en los polímeros capaces de almacenar información, es una condición necesaria para que esta capacidad informacional sea manifestada efectivamente en en y para el sistema mismo (aquella requerida para el mantenimiento de las redes estructurales de su organización interna, para lo cuál parecen servir mejor los péptidos; y aquella necesaria para guardar un “expediente” de posibles comportamientos internos de las redes de interacción para hacer frente al medio externo, para lo que los ácidos nucleicos parecen ser más aptos).

De este modo se considera el origen de la condición homoquiral en los polímeros informacionales biológicos, como un sistema autoorganizado, pues las propiedades emergentes que pueden ser observadas en un sistema, como la dinámica biológica que sustenta la vida, se encuentran soportadas por una base material, consistente de elementos que pueden ser organizados de manea propia por el sistema, y donde esta organización les permite hacer efectivas propiedades contenidas en ellos. Así, polímeros homoquirales (o muy cercanos a dicha condición), al ordenarse de este modo asimétrico son capaces de hacer efectiva su propiedad de poder almacenar información en una molécula quiral, como la propuesta de Carroll (2009), lo sugiere inicialmente.

La postura que asume el inicio de la homquiralidad biológica como un fenómeno posterior a la aparición de la vida, alude a la elección por parte de los sistemas vivos del enantiómero más abundante en el ambiente, debido al aporte asimétrico de materia orgánica proveniente de las colisiones de meteoritos y otros cuerpos como el polvo estelar con la Tierra (con un L-ee a favor de los aminoácidos, como ya se ha mencionado). Esta elección se supone producto del carácter oportunista de la vida, y se han dado argumentos que además consideran que la interacción dentro de los sistemas biológicos se facilita entre elementos homquirales (como la síntesis de proteínas, donde el RNA se basa en D-ribosas y el ribosoma, por reconocimiento espacial de secuencias de dicho polímero homquiral, ensambla L-aminoácidos), que sin embargo, puede decirse, resultan favorables no porque permitan al sistema (vivo) desarrollar dichos procesos, sino porque, precisamente en sentido contrario, al emplear estos elementos abundantes de manera inicialmente fortuita, el sistema es capaz de establecer tales procesos.

Los escenarios que, por el contrario, conciben el inicio de la condición homquiral previo a la aparición de la vida, se basan fundamentalmente en el hecho ya descrito en este trabajo de la existencia de L-ee en aminoácidos de origen netamente interestelar; a lo que argumentan que el aporte asimétrico extraterrestre fue clave para el establecimiento de los primeros sistemas potencialmente biogénicos. Sin embargo, nada se dice sobre de qué modo se favoreció el establecimiento de un sistema biogénico, ni qué propiedades se sustentan a partir de ello. Los argumentos posteriores a este inicio prebiótico de la homquiralidad son los mismos a los presentados por quienes consideran dicho inicio como una elección (oportunista) de la vida.

En esta tesis, y en la propuesta que a continuación definimos, presentamos la hipótesis por medio de la cuál proponemos un papel fundamental de la condición homquiral en los polímeros biológicos que pueden almacenar algún tipo de información. Las primeras evidencias de esta propuesta las presentamos y discutimos críticamente, como un aporte teórico para dirigir nuevos protocolos sobre el origen y evolución temprana de la vida en la Tierra (y potencialmente en otros planetas), siendo una hipótesis original y un aporte novedoso de este trabajo, la concepción de que la historia (evolutiva) por medio de la cual, un sistema es capaz de adquirir y desarrollar la capacidad de almacenar información es la misma que aquella por medio de la cuál este mismo sistema adquiere y desarrolla una condición homquiral en sus polímeros informacionales y es, a su vez, el mismo proceso por el que un sistema prebiótico puede soportar una dinámica de interacción y mantenimiento de su integridad interna para desarrollarse en, como el profesor Alfonso L. Herrera llamaba (1924), un protobio.

Conceptos

Sistemas Autoorganizados y Propiedades Emergentes

Podemos definir a los Sistemas Autoorganizados como aquellos cuya dinámica interna entre sus elementos constitutivos adquieren un orden o patrón de organización sin que un factor externo a ellos que no sea sus interacciones, regule dicha organización. Este tipo de sistemas generalmente pueden intercambiar tanto materia como energía con su entorno, sin que este intercambio dirija o regule de algún modo su ordenamiento interno. El intercambio

únicamente aporta recursos (materiales y/o energéticos), que el sistema emplea por sí mismo para manifestar un orden basado en la interacción de sus elementos (ver anexo 1).

Como puede notarse, un fenómeno de autoorganización es la manifestación visible de cierto tipo de interacciones heterogéneas entre los elementos de un sistema actuando simultáneamente, al cual le otorgan orden. Esta capacidad de autoorganizarse está determinada por la naturaleza material de los elementos que entran en una relación mutua y las posibles interacciones que son capaces de establecer. En este sentido, si bien el número de posibles interacciones no son reducidas en cuanto a número, el tipo de organización que se adopta en el sistema representa sólo una de las múltiples posibles configuraciones, la cual no es única y puede ser cambiada por otro tipo de interacciones equivalentes, igualmente estables e igualmente probables, si algún factor que determina la interacción es modificado.

Dentro de estos modos de relacionarse entre los elementos del sistema, las propiedades de éstos se hacen visibles al volverse propiedades dinámicas dentro de la interacción, por medio de las cuales los elementos se “reconocen” como similares al ser portadores de dichas propiedades de modo natural (en el anexo 1 se encontrará un ejemplo de esto). Este “reconocerse” dentro de la interacción y hacer dinámicas estas propiedades por medio de las cuales se relacionan los elementos, nos hace evidente que del tipo de interacción que se establece se puede obtener información acerca de las propiedades contenidas en los elementos del sistema; información que fuera de la interacción no se puede verificar, aún cuando los elementos sean portadores individuales de dicha propiedad. Es aquí donde debemos enfatizar una primera cuestión importante de los sistemas complejos: que el tipo de interacción promueve la manifestación de ciertas propiedades contenidas de manera inherente en los elementos del sistema, sin que estas sean confundidas con las propiedades emergentes, por lo que las interacciones aportan información adicional de éste. Sin las interacciones, esta información sobre los elementos del sistema, y por lo tanto del sistema mismo, se pierde o simplemente no se observa.

De este último hecho se desprende la cualidad distintiva de un sistema autoorganizado, pues al hacerse dinámicas ciertas propiedades comunes a los elementos, por medio de las cuales pueden establecer interacciones mutuas, este dinamismo se convierte en manifestación colectiva de dichas propiedades que, sólo al hacerse globales y comunes a los elementos, soportan propiedades cualitativas novedosas que dependen del tipo de interacción que le dan identidad al sistema. Esta identidad cambia cuando cambia el tipo de interacción y se modifican estas propiedades cualitativas, a la vez que desaparecen cuando la relación dinámica entre los elementos se detiene o emerge cuando las interacciones son establecidas. Motivo por el cual, a este tipo de propiedades soportadas enteramente por la interacción dentro del sistema se les llama Propiedades Emergentes, y son propiedades que se originan y nacen únicamente del establecimiento de las interacciones, sin que los elementos contengan algún tipo de información o propiedad que defina esta emergencia de patrones o de propiedades.

Las propiedades emergentes en un sistema son, por lo tanto, propiedades novedosas que se originan sólo como consecuencia de la organización de un sistema, y son propiedades en la naturaleza que nacen con los distintos niveles de organización de la materia,

correspondientes a cada nivel de organización. Lo anterior en clara diferencia con la manifestación de propiedades contenidas a natura en los elementos, pues las propiedades emergentes no son manifestaciones visibles de ellas contenidas en éstos de forma individual, sino manifestaciones colectivas de patrones o propiedades emanadas del tipo de relación interna del sistema. Estas propiedades emergentes, al definirse dentro de ciertas condiciones ambientales, se ven favorecidas o no por dichas condiciones, pudiendo ser estables o inestables y mantenerse o no en el tiempo.

Sistemas Complejos

Por su parte, un Sistema Complejo lo podemos definir como un sistema que presenta elementos heterogéneos interconectados formando una red de interacciones, por medio de la cual el sistema experimenta procesos de autoorganización y la consecuente emergencia de patrones y propiedades. Este tipo de sistemas se sustenta fundamentalmente por las propiedades que se generan de la interacción entre sus elementos y la emergencia de patrones, por lo que no puede ser entendido si se aíslan y estudian las partes que lo componen por separado. Resultando la naturaleza y propiedades del sistema complejo una consecuencia no obvia a partir de sus elementos individuales, que pueden ser en sí mismos también sistemas.

Una característica fundamental de este tipo de sistemas es la no linealidad entre las interacciones de los elementos que los constituyen, pues a partir de la relación simultánea de éstos, afectándose colectivamente en el sistema, las propiedades que emergen no son consecuencias proporcionales de los procesos de autoorganización que se han efectuado, provocando que estas consecuencias sean de mayor o de menor magnitud que las causas que las originan, dando paso a una alta estructura interna.

Otra característica de los sistemas complejos es la alta sensibilidad a las condiciones iniciales, pues siendo sus procesos de autoorganización la base de las propiedades emergentes que el sistema sustenta, un cambio en las condiciones con las que inicia a definir sus interacciones conduce al establecimiento de relaciones dinámicas que dan pie a manifestaciones colectivas de propiedades distintas a las establecidas bajo otras condiciones iniciales diferentes (ver anexo 2). Además de esta sensibilidad a las condiciones iniciales, un sistema complejo también presenta sensibilidad a pequeñas perturbaciones externas, por lo que éstas son capaces de desviar la dinámica hacia configuraciones diversas con los mismos elementos, originando propiedades diferentes en el sistema; motivo por el cual, un sistema complejo puede encontrarse en constante cambio interno y evolución al interactuar con su medio circundante.

Cuando uno de estos sistemas es analizado, puede hacerse un estudio de sus partes por separado para analizarlas fuera de la interacción con fines de simplificar el estudio e identificar elementos o interacciones locales clave para la estructura global del sistema, pero para ello siempre es necesario regresar, habiendo hecho esta abstracción, a la totalidad del sistema complejo situando dicho elemento, o interacciones locales, dentro de las relaciones y propiedades colectivas. Al hacer esto, el sistema puede verse como un conjunto dinámico de múltiples interacciones y elementos heterogéneos manteniendo una

estructura complicada debida a las interacciones mutuas, a la vez que modificándola por su capacidad de variar el sentido y dirección de las relaciones entre elementos.

Finalmente, cabe aclarar que mientras un sistema autoorganizado es aquel que presenta procesos de autoorganización que le confieren la capacidad de manifestar propiedades emergentes, como ya lo hemos definido, un sistema complejo también presenta procesos de autoorganización además de presentar una configuración interna altamente estructurada, con elementos heterogéneos estableciendo las propiedades ya mencionadas de sensibilidad a las condiciones iniciales, constante evolución con su medio externo, propiedades definidas exclusivamente de la interacción de los elementos y la no linealidad en estas relaciones. De este modo, los sistemas vivos son ejemplo de sistemas complejos, tal como se discute a continuación.

Los Sistemas Vivos como un Conjunto Autoorganizado

La mera colección de elementos en un sistema no explica sus propiedades dinámicas, sino que hacen falta sus interacciones y organización a lo interno de él. En este sentido, la obtención de un conjunto de moléculas biogénicas no definen por sí mismas a un sistema vivo, sino que es la manera en cómo estos elementos se organizan e interaccionan dentro del sistema la que define las características de los sistemas biológicos. Las características dinámicas de un sistema vivo se encuentran definidas por la propiedad de la materia organizada que conocemos como vida, lograda al establecerse ciertas relaciones entre los elementos de dichos sistemas y que puede ser sustentada gracias a la estructura que se genera al organizarse estos elementos en el sistema: “*todo evoluciona y se desarrolla de lo homogéneo a lo heterogéneo*” (ley de la evolución, enunciada por Herrera, 1932).

La información contenida en los ácidos nucleicos de los sistemas biológicos tienen, en última instancia, la información necesaria para permitir que sean sintetizados los elementos necesarios para el organismo, es decir, tienen la información para sintetizar los elementos del sistema que permiten establecer la organización e interacción de los elementos moleculares dentro del organismo vivo. En otras palabras, la autorreproducción de un patrón de estructura interno con todo y su dinámica e interacciones (una red) es lo que permite la emergencia de la vida como una propiedad posible en este patrón de organización que acepta modificaciones en sus elementos (mutaciones) bajo la condición indispensable de que estas modificaciones permitan que la organización siga soportando la dinámica interna del organismo. Lo anterior bien acepta los fenómenos de epigenética, donde la herencia de características en elementos del sistema no depende de manera alguna de la información en los ácidos nucleicos, como sucede en el caso de la herencia de priones por la llamada “herencia citoplásmica” que ocurre cuando la célula se divide y el citoplasma, con sus elementos, lo hace también; lo que nos permite suponer con toda validez que lo que se hereda, en última instancia en los sistemas vivos, es la organización del sistema y su dinámica interna; tal como lo postula la teoría de la autopoiesis (Varela, *et al.*, 1974).

Cornish-Bowden y Cárdenas (2008) mencionan que “*una característica fundamental de los organismos vivos es su habilidad para conservar su integridad en la organización, a pesar de los cambios en su ambiente y a pesar de la duración finita de todos sus componentes*”;

lo que refuerza la afirmación aquí hecha de que la herencia, en última instancia, es la herencia de la organización e interacciones internas de los sistemas biológicos que, pese a lo complejo que puede ser la vida en la actualidad, no tiene por qué haber sido así en el principio: “*la aplicación repetitiva de reglas muy sencillas puede generar estructuras complejas. La observación de una estructura compleja, por lo tanto, no garantiza un fundamento complejo*” (Mandelbrot, 1977; citado por Cornish-Bowden y Cárdenas, 2008).

Con base en lo anteriormente propuesto, un mundo primigenio con formas de vida muy tempranas ya debiera de haber tenido esta organización mínima que le permitiera soportar la vida como un proceso dinámico y, por lo tanto, es lógico suponer que los primeros mecanismos de herencia, al igual que los actuales, se hacían manteniendo esta estructura e interacciones internas, aún cuando los elementos pudiesen sufrir variaciones. Como estamos intentando justificar, la homoquiralidad de los componentes biológicos es una condición que permite almacenar información espacial con mayor eficiencia y, por lo mismo, es un tipo de organización de los elementos que integran los sistemas biológicos, necesaria para poder soportar la dinámica de los procesos de la vida. Es decir, en el presente trabajo se supone la condición homoquiral como un requisito previo al origen de los sistemas vivos. Suposición que se sustenta en el argumento que ya hemos comenzado a sugerir de la capacidad de transmisión y almacenamiento de información por parte de las moléculas quirales, y su condición homoquiral en la construcción de polímeros; además de los hallazgos hechos de excesos enantioméricos encontrados en los meteoritos Murchison, Murray y Allende, que muestran que la ruptura de la simetría en mezclas racémicas es un fenómeno frecuente en el universo, además de abiótico. Por si fuera poco, el exceso enantiomérico encontrado en estos meteoritos es a favor de los L- α -metil aminoácidos, es decir, la misma quiralidad que la presente en los aminoácidos biológicos.

Dado que uno de los productos frecuentes en los experimentos de tipo Miller-Urey son los aminoácidos (aunque en proporción racémica), además de estar también estos presentes en meteoritos condritas carbonáceas, desarrollamos la idea de que la síntesis de aminoácidos a partir de un medio aquiral, como la síntesis de Strecker, puede verse influida asimétricamente por la presencia de un sustrato quiral compuesto de nanotubos de carbono con un exceso enantiomérico D, induciendo así la RES en los aminoácidos y provocando su L-ee. Partiendo de esta asimetría, monómeros de aminoácidos sujetos a radiación ionizante en el medio interestelar, pueden adquirir un dinamismo interaccionando entre sí y con la superficie asimétrica, del modo que proponen Martínez-Mekler *et al.*, (1999; ver figura 15). Esta interacción entre aa quirales a partir de un medio aquiral con el sustrato asimétrico puede dar paso a una dinámica heterogénea, donde los L-aa pueden ser absorbidos de manera preferencial por el sustrato quiral, tras servir como una fuente inicial de asimetría para su síntesis. El componente de la radiación ionizante paralelo a la superficie, puede causar el reconocimiento e interacción de los monómeros sobre los canales quirales de D-nanotubos de carbono y producir polímeros homoquirales.

Esta interacción induciría a los monómeros de la misma quiralidad a permanecer “pegados” a los nanotubos de carbono con quiralidad opuesta, estabilizando el exceso enantiomérico y retardando la racemización. Este exceso enantiomérico llegarían a la superficie de la Tierra por impactos meteoríticos durante el periodo de acreción, aportando los elementos materiales y el desajuste inicial para favorecer la condición homoquiral en los péptidos y

soportar la organización de algún sistema que pueda desarrollar la dinámica de los procesos biogénicos en el planeta Tierra.

Las cadenas homquirales de L-aminoácidos podrían inducir la ruptura espontánea de la simetría en otras moléculas orgánicas como en los azúcares, del modo que lo señalan los experimentos de Weber (1997) y Weber y Pizzarello (2006; citados por Pizzarello, 2007) donde se ha inducido la condensación de D-glicolaldehído y otros azúcares de cuatro carbonos de la misma serie quiral D, empleando como agentes catalíticos aminoácidos individuales o dímeros homquirales de aminoácidos, todos ellos de la serie L. Esta condición homquiral, previa al desarrollo de los sistemas vivos, pudo lograr estabilidad al plegarse las cadenas homquirales de L-aminoácidos logrando una conformación β -amiloide, siendo más estable ante variaciones térmicas, radiación e hidrólisis, como lo señala Maury (2009) al considerar esta conformación como más estable que cualquiera adoptada por el RNA; además, la estructura β -amiloide adquiere capacidad catalítica y un sistema de copiado por medio de emparejamiento, similar al de los priones, logrando heredar, de este modo, la organización e interacciones (la red) dentro de un sistema que pueda soportar la dinámica de los seres vivos; permitiendo la variación (mutaciones) entre los elementos estructurales de dicha red, sin necesidad inicial de los ácidos nucleicos.

A la paradoja que establece la síntesis de proteínas a partir de los ácidos nucleicos empleando proteínas para dicha síntesis, cuestionando el ¿cómo sintetizar proteínas a partir de RNA si se necesitan proteínas para ello? (Ricardo y Szostak, 2009), desaparece si se deja de considerar que los ácidos nucleicos son los únicos que pueden almacenar información, y se considera la capacidad informacional espacial contenida en los aminoácidos quirales, como lo hace Carroll (2009). Pudiendo suponer la existencia de un “mundo de los péptidos”, anterior al “mundo del RNA” y con independencia de estos ácidos nucleicos para almacenar y transmitir información. Así, un exceso enantiomérico de L-aminoácidos podría interactuar con los ácidos nucleicos en etapas posteriores de la evolución biológica donde estas moléculas puedan ser estabilizadas, induciendo no sólo la quiralidad en ellas (D-ribosa, para el caso inicial del RNA), sino también la dinámica en la interacción de cada tres unidades entre un aminoácido individual y la cadena polimérica de RNA, fijando así el codón de tres bases como consecuencia de la dinámica interna del sistema. Transfiriendo la información para heredar la red en los sistemas biológicos a los ácidos nucleicos. Por lo que resulta muy probable que las proteínas hayan aparecido primero en un sistema biogénico.

Al poético polvo de estrellas, que sirve como sustrato para la condensación de gases y la formación de diversas moléculas orgánicas en el medio interestelar (Ehrenfreund y Charnley, 2000) le sigue, tras varios procesos de interacciones y organización estocásticas, la nucleación de moléculas biogénicas que son el sustento material para manifestar la vida, una vez que adquieren cierta organización e interacciones dentro de un sistema. Tras originarse diversas variantes de esta red de organización basadas en la condición homquiral, y dadas por la generalidad de los procesos que dan paso a la autoorganización de la materia, en parte, y por otra a que muy posiblemente el origen de la vida tuvo lugar en ambientes alejados del equilibrio, como sugieren los trabajos de Kompanichenko (2008; 2009), donde señala que la aparición de una red capaz de invertir su proporción de la contribución a la energía libre y a la entropía, aumentando la proporción con la que obtiene

la primera y reduciendo la proporción con la que contribuye al ambiente externo con la segunda, logrando organizarse, sólo puede ser posible en ambientes inestables que oscilan entre extremos opuestos y, por lo tanto, favorecen configuraciones opuestas al interior del sistema con iguales (o equivalentes) elementos. Esta dinámica interna definida para los procesos biológicos sería la fuerza innovadora de la propiedad que conocemos como vida en estos sistemas, y la selección natural actuaría como el “volante” que da dirección a esa organización, hasta los sistemas que actualmente identificamos como vivos. Los cambios en el modo de asociación de los elementos (las redes que se establecen en el sistema) permitiría las innovaciones necesarias, pudiendo inducir cambios abruptos, pues no dependen de la aparición o integración al sistema de nuevos elementos, sino del cambio en las relaciones que se establecen entre estos componentes.

Marco Teórico y Definición de Nuestra Teoría

Autoorganización y Sistemas Biológicos

Un problema fundamental en los experimentos actuales sobre el origen de la vida es la incapacidad de crear un sistema fisicoquímico capaz de mantenerse por sí mismo, empleando recursos de su entorno, con la propiedad de autorreproducirse y de establecer una organización e interacciones en su interior entre los elementos moleculares que lo conforman, y que la información para su estructura interna pueda ser heredada y modificada de tal modo que sea capaz de diversificar y permanecer en el tiempo.

Además, dado que todos los sistemas biológicos conocidos (incluyendo en este caso también a los virus y los priones) presentan una condición homoquiral en sus polímeros informacionales (péptidos y ácidos nucleicos [para el caso de los virus, sólo los segundos; para los priones, los primeros]), el problema se hace medular, pues no basta con la simple obtención de los componentes biogénicos por medio de procesos que pudieron haberse dado en la Tierra primitiva sino que, además, estos componentes, siendo quirales, sean obtenidos cada tipo en una sola quiralidad (por lo menos de manera preferencial). Es sabido que virtualmente todos los aminoácidos quirales que constituyen las proteínas son de la serie L y que los azúcares que conforman a los ácidos nucleicos (RNA y DNA) son de la serie D; siendo así un hecho que, dentro de los sistemas biológicos, los elementos que contienen información acerca de la integridad interna del sistema presentan una condición homoquiral en los elementos moleculares que los constituyen; de tal modo que en esta tesis desarrollamos la hipótesis de que esta condición es un tipo de organización necesaria para aquellas macromoléculas que contienen información relevante para la supervivencia de los organismos.

Los primeros investigadores en el área del origen de la vida se enfrentaron al problema de mostrar que los elementos biogénicos, las moléculas orgánicas presentes en los sistemas vivos y muchas rutas metabólicas relacionadas con fenómenos biológicos (como la fermentación) pueden originarse por procesos abióticos y tener su origen y desarrollo sin necesidad de que sean involucrados factores bióticos. Dentro de estos esfuerzos se encuentra la teoría de Oparin, que intenta explicar, además, cómo y cuáles fueron estos procesos abióticos capaces de generar moléculas biogénicas; muchas de ellas ya sintetizadas en laboratorios químicos. La prueba más evidente de estos trabajos son los

experimentos de Miller, donde son sintetizados aminoácidos y azúcares en un matraz de reacción por la presencia de una mezcla de gases reductores, amonio y una descarga eléctrica a manera de chispa que suministra la energía suficiente al sistema. Las posteriores variaciones de experimentos tipo Miller-Urey han mostrado que la gran mayoría de moléculas esenciales para la vida pueden ser sintetizadas por rutas completamente abióticas (Orgel, 1998).

Sin embargo, a pesar de que pueden ser obtenidas una amplia gama de constituyentes moleculares de los sistemas biológicos por medio de reacciones abióticas en matraces de reacción en los laboratorios, la simple colección de elementos de este tipo no ha logrado originar un sistema que pueda emular las características mínimas de un sistema vivo. Problema que ha dado pie a los vitalistas actuales para fundamentar sus críticas aludiendo a este supuesto “fracaso” de la ciencia, argumentando que no se ha podido obtener un sistema vivo obteniendo los elementos biogénicos en experimentos de síntesis química prebiótica. Y a pesar de que por el momento es verdad tal señalamiento, se olvida el hecho de que esta misma crítica se hacía ante los primeros intentos de obtener proteínas u otras moléculas biológicas, como productos metabólicos; y a pesar de los iniciales tropiezos, éstas fueron sintetizadas y hoy se sabe que en el medio interestelar, así como en superficies de cometas y meteoritos también son formadas moléculas orgánicas e incluso aminoácidos (Ehrenfreund y Charnley, 2000); mostrando la universalidad de los procesos químicos y físicos que originan las moléculas relacionadas de manera importante con los sistemas vivos.

En la actualidad se acepta que las moléculas potencialmente biogénicas pueden ser obtenidas como una colección de elementos moleculares, y que éstas pueden ser formadas por medio de reacciones comunes a varias de ellas (por lo que no es necesario buscar una ruta química particular para cada componente molecular). Sin embargo, la idea de que al obtener este conjunto de elementos, por si mismos podrán generar un sistema vivo, es un punto de vista que comienza ya a ser modificado cada vez de manera más frecuente, y el énfasis que se hace no en la colección de elementos de un sistema (en este caso, moléculas biogénicas), sino en las interacciones que establecen éstos al interior de dicho sistema y entre ellos, son formas de abordar el problema que se encuentran definidas en el estudio de los sistemas complejos (ver anexo 2).

Esta visión de poner énfasis en las interacciones entre los elementos de un sistema, una vez teniendo identificados los elementos involucrados en la dinámica (no necesariamente todos) y las interacciones básicas que se establecen entre ellos, tuvo una inicial incursión con avances interesantes en los trabajos de Alfonso Luis Herrera y los plasmogenistas, donde se buscaba obtener un sistema vivo partiendo del obtener procesos y dinámicas entre componentes químicos (como silicatos, aceite, etc.), sin que necesariamente los elementos empleados estuvieran presentes en los sistemas vivos actuales, pero con la condición indispensable de que emularan procesos dinámicos y de organización en ellos (como las corrientes y presiones osmóticas). Los resultados experimentales mostraron que los patrones de organización de estos componentes abióticos emulaban las formas biológicas (figura 18), no sólo en su morfología, sino también en algunos procesos dinámicos (como movimientos “ameboides” y putativas divisiones “celulares”). Sin embargo, no pudo ser obtenido un sistema capaz de ser considerado vivo de ningún modo, aunque muchos de sus

procesos dinámicos y de organización espacial se lograban simular de manera consistente en los resultados de la plasmogenia. Un estudio refiriendo los trabajos de Leduc (Cronish-Bowden y Cárdenas, 2008) ya hace notar que estos experimentos confirman la universalidad de los fenómenos biogénicos, en este caso, los relacionados con la autoorganización de la materia para generar el sustrato espacial y material que pueda dar alojamiento a la dinámica de un sistema vivo, permitiendo con éste la capacidad de mantener la organización interna de la vida que, pese a todo, aún no ha sido lograda en algún laboratorio. En su libro de 1924, Herrera escribe: “*Estos experimentos confirman la presunción que propusimos desde el principio de nuestros trabajos, diciendo que la vida tuvo su origen en el mundo inorgánico y que no se comprende que pudiera formarse con las materias orgánicas que ella misma sintetiza*”.

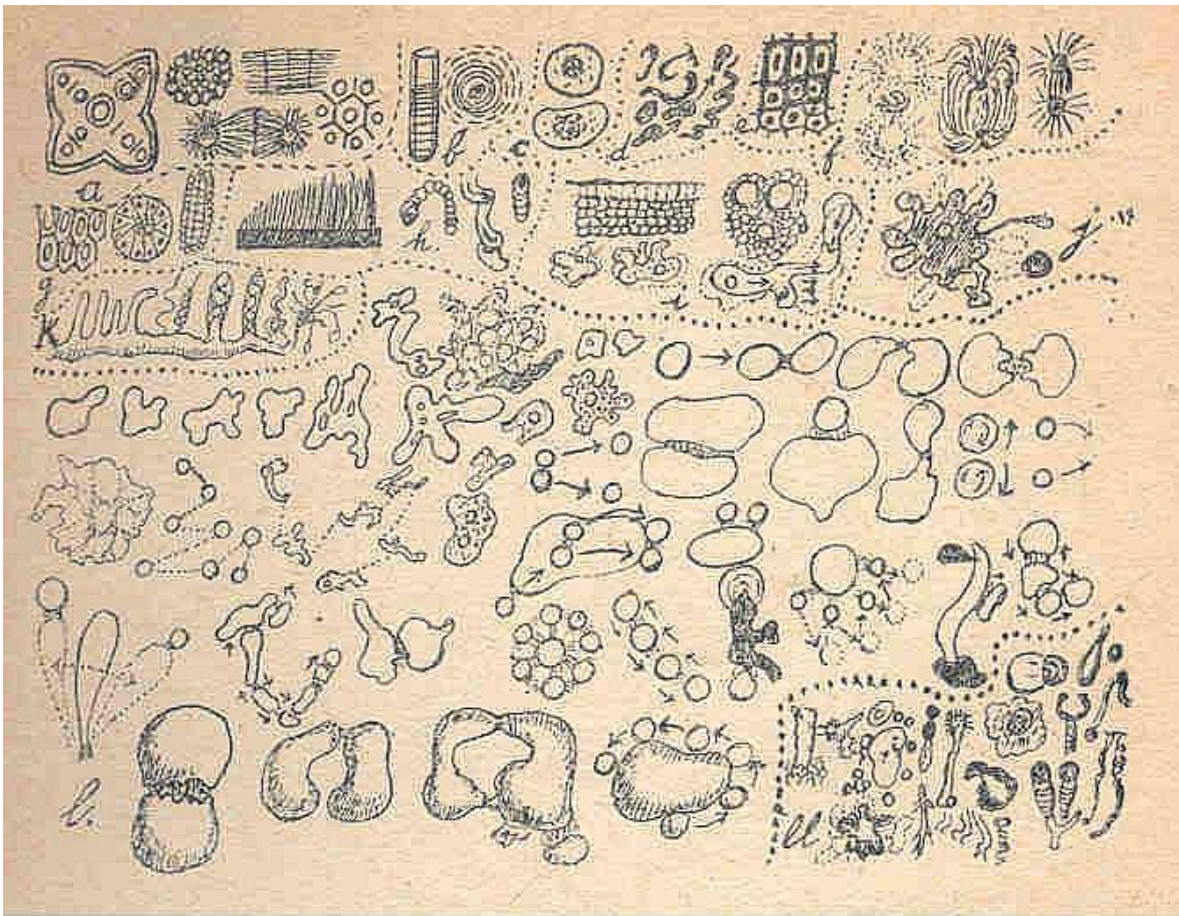


Figura 18.- “Colpoides”. Putativas formas de vida artificial, logradas por procesos de crecimiento de cristales a partir de la oxidación del aluminio. Puede verse que, si bien estas estructuras distan de ser formas biológicas, son evidencia de patrones de autoorganización de las sustancias empleadas (como el aluminio y la sosa cáustica), que parecen emular formas vivas. *Tomado de Herrera, 1932.*

En este contexto, donde las propiedades dinámicas de los sistemas que se establecen por medio de las interacciones entre sus elementos o componentes les dan propiedades características, a manera de propiedades emergentes originadas por la organización del

sistema, nosotros consideramos que la homoquiralidad de los polímeros biológicos se presenta como un modo particular de organización en los sistemas vivos que sustenta la emergencia de nuevas propiedades enmarcadas en tales sistemas. En particular, aquí tratamos los resultados de tres trabajos que nos aportan una evidencia inicial para considerar esta asimetría biológica como un modo de organización de los sistemas, que soporta la emergencia de la propiedad de almacenar información en ellos: uno es un modelo matemático que emula la dinámica ribosomal prebiótica, el segundo se trata de un índice que mide la estructura termodinámica del DNA y el otro es un intento por definir qué es la vida, con base en la teoría de la información.

Antes de presentar la evidencia que nos sugiere inicialmente nuestra hipótesis, afirmamos que la capacidad de almacenar información en un sistema no “flota en el aire”, sino que es el resultado de un modo particular de organización de la materia.

El modelo matemático ha sido desarrollado entre 1996 y 2003, logrando mostrar que la dinámica de interacción entre monómeros de partículas ionizadas que se desplazan sobre cadenas poliméricas, establece un desplazamiento no uniforme que se da, en promedio, cada tres monómeros de la cadena. Según predice el modelo de la dinámica de interacción sobre las cadenas poliméricas a modo de canales, los potenciales de interacción entre estas partículas y los polímeros definen una regularidad espacial de cada dos monómeros como la distancia más probable en la aparición de mínimos consecutivos de la interacción, pero la distancia de tres monómeros entre ellos es la distancia promedio (Martínez-Mekler *et al.*, 1996; Aldana *et al.*, 1998; figura 19).

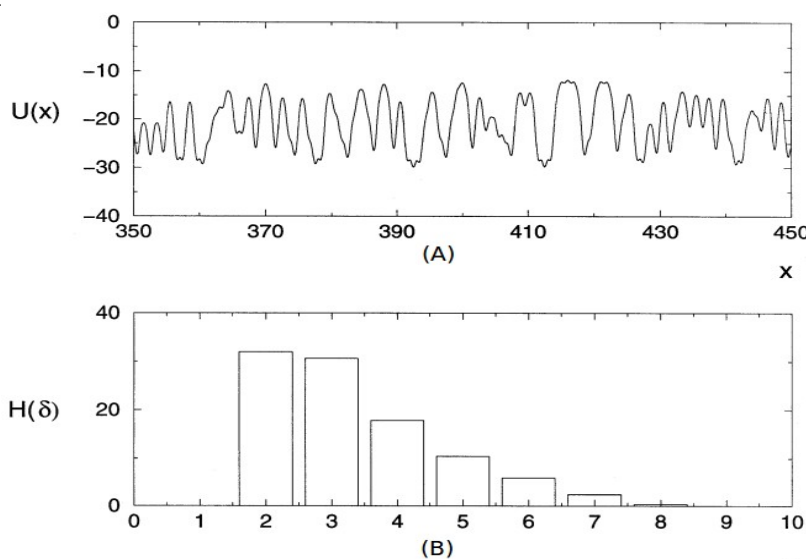


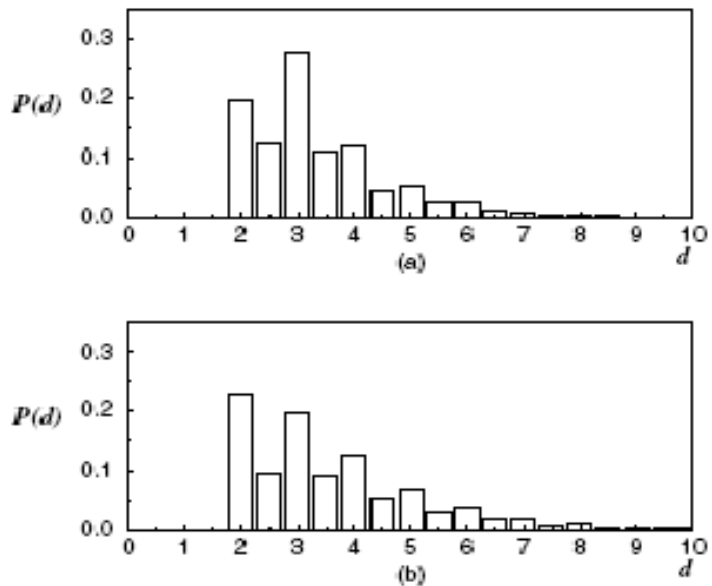
Figura 19.- Distribución de mínimos en potenciales de interacción. Se muestra el número de mínimos en un intervalo de 350-450 monómeros de una cadena en interacción con una partícula cargada, haciendo notar que los 31 mínimos registrados establecen una distancia promedio entre ellos de 3.22 monómeros (A). Mientras tanto, el valor más probable en la distancia entre mínimos consecutivos mostrado en el histograma, es de 2 δ monómeros (B). Tomado de Aldana *et al.*, 1998.

Estos resultados son obtenidos si son tomadas secuencias de números con los valores de ± 1 y ± 2 generadas aleatoriamente, representando secuencias de polímeros con una estructura interna al azar; pero si son tomadas secuencias de monómeros en cadenas que transportan información, el resultado es interesante: cuando el modelo es corrido empleando secuencias

genómicas de organismos reales sacadas del GenBank, y donde los valores de ± 1 y ± 2 representan arbitrariamente cada una de las cuatro bases nitrogenadas, el resultado de una distribución de cada dos monómeros en los mínimos de interacción es repetido nuevamente si son empleadas las secuencias intergénicas de los genomas, que no codifican para proteínas, sin embargo, cuando son tomadas las secuencias codificantes (exones), se obtiene una distribución más probable de cada tres monómeros en la distancia de la aparición de mínimos consecutivos de la interacción, además de que el promedio también es de 3 monómeros (Aldana-González *et al.*, 1998, 2003; figura 20).

Figura 20.- Probabilidad en la distancia de mínimos consecutivos.

Empleando secuencias codificantes de *Drosophila melanogaster* (a), se observa que la distancia más probable entre mínimos consecutivos es de 3 monómeros; mientras tanto, al usar las secuencias no codificantes del genoma (b) se obtiene que la distancia más probable entre mínimos consecutivos es de 2 monómeros. Tomado de Aldana *et al.*, 2003.



Estos resultados no sólo muestran que las regiones no codificantes se comportan de manera similar que los polímeros con secuencias aleatorias, sino que presentan la evidencia de lo que Chela-Flores (1994) menciona: “[...] las macromoléculas de la vida son comunes pero contienen una propiedad que las separa de las formas más ortodoxas de la materia condensada, llamada información”. Es decir, a pesar de que el modelo es realizado para mostrar que en términos muy generales, la dinámica de polímeros interaccionando con partículas con carga eléctrica, define una regularidad espacial que determina una regularidad en la dinámica de interacción de cada tres monómeros en el polímero, que se hace robusta cuando el polímero contiene información, y que esto puede tener implicaciones prebióticas en la dinámica ribosomal, definiendo el origen del codón de tres monómeros del código genético como el resultado de la dinámica intrínseca del sistema, al ser reinterpretado este resultado, se pone de manifiesto que la propiedad de almacenamiento de información específica en los polímeros se alcanza como consecuencia de una organización específica en la secuencia de los monómeros, donde proponemos que una propiedad debe estar presente en los elementos que integran el polímero, a saber: dado que el modelo empleó secuencias reales de genomas de organismos, y estos genomas presentan una condición homoquiral en sus elementos de construcción (D-desoxiribosa y, en particular, D-ribosa para el RNA de transferencia que, junto a los L-aminoácidos de las proteínas ribosomales, es el que interacciona con el RNA mensajero estableciendo la dinámica ribosomal de tres en tres monómeros), la homoquiralidad en las moléculas de un

polímero capaz de almacenar información, se presenta putativamente como una condición necesaria en los elementos materiales de soporte de un sistema vivo, pues favorece una organización que permite la optimización en el almacenaje y transferencia de información útil para el sistema.

Sin embargo, es importante aclarar que no estamos sugiriendo aquí que tan sólo con emplear monómeros de una misma quiralidad en la construcción de un polímero da como consecuencia el almacenamiento de información necesaria para un sistema vivo, sino que queremos hacer notar que ésta condición homoquiral permite la emergencia de propiedades novedosas: el almacenamiento de información, que es una consecuencia cuando los bloques son ordenados de un modo especial como en los exones homoquirales, que codifican aminoácidos también homoquirales (y con quiralidad opuesta). El modelo incluso muestra que esta dinámica en la interacción, se ve reforzada si los monómeros son todos de una misma quiralidad (Martínez-Mekler *et al.*, 1996).

Por su parte, el Índice de Homogenidad del DNA (IHD), propuesto por Miramontes *et al.* (1995), muestra la existencia de un orden en la estructura con la que las regiones codificantes del genoma se organizan. Al emplear secuencias aleatorias, de manera similar al trabajo antes mencionado, el índice, al ser graficado en un plano definido en un espacio geométrico denominado por los autores como Ω , arroja valores que se distribuyen sobre el origen (figura 21), evidenciando que estas secuencias no se alejan del equilibrio, no presentando de este modo, algún tipo especial de organización en su estructura. Sin embargo, cuando son tomados los genomas de organismos reales, y sus secuencias intergénicas, así como las exogénicas son graficadas tras emplear el IHD, nuevamente dos clases de resultados son obtenidos: por una parte, al correr el índice empleando las secuencias intergénicas de organismos representantes de los distintos *phyla* eucariontes, los valores obtenidos tienden a distribuirse sobre el origen del espacio Ω ; sugiriéndonos la incapacidad de manifestar algún orden preciso en la forma de organizar su estructura interna.

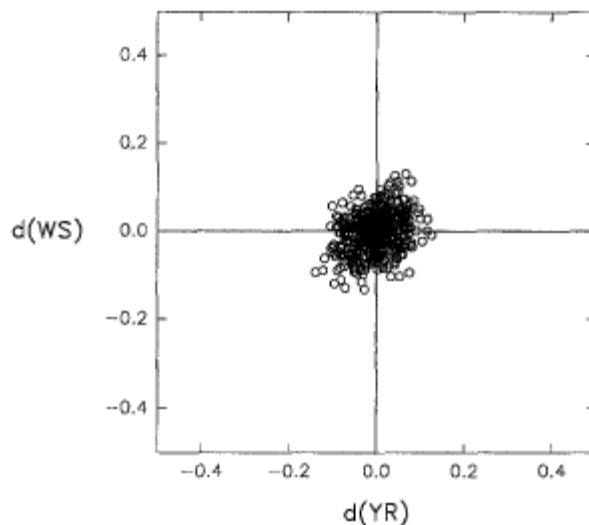
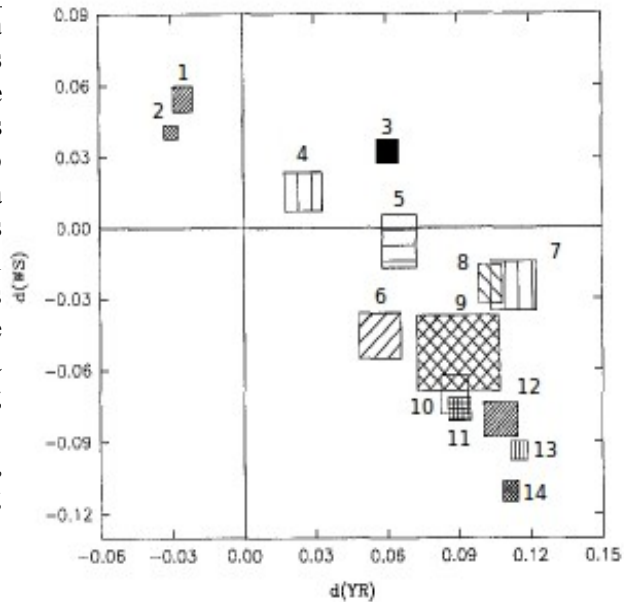


Figura 21.- Distribución de valores arrojados por el IHD empleando secuencias aleatorias. Se presentan los valores calculados para 1000 secuencias aleatorias de 500 monómeros de longitud, empleando el IHD. Tomado de Miramontes *et al.*, 1995.

Caso contrario se obtiene si son las regiones exogénicas las que son incluidas al modelo por medio del IHD: los valores arrojados para los genomas empleados, considerando

únicamente sus exones, representan valores en el espacio Ω que se agrupan para cada genoma y se alejan del origen, además de que se distribuyen hacia la periferia del plano $[-1, 1] \times [-1, 1]$ definido dentro de Ω ; resultados que nos dejan ver que en estas secuencias codificantes de los genomas (desde procariontes hasta mamíferos), existe un orden que aleja estas secuencias del equilibrio en su estructura interna (figura 22). Situando de nueva cuenta estos resultados en una reinterpretación análoga para los resultados de las secuencias intergénicas, podemos recurrir a estos resultados para afirmar que en estas regiones codificantes emerge o se manifiesta un orden especial en la estructura del polímero (DNA), no manifestado en las secuencias intergénicas, y muy posiblemente por completo ausente en las aleatorias.

Figura 22.- Tendencias de distribución a formar agregados por parte de las secuencias de exones de genomas de organismos reales. Se presentan las tendencias a distribuirse sobre el plano formado por los ejes dYR (según la proporción de purinas y pirimidinas en las secuencias genómicas) y dWS (según el apareamiento de bases AT/CG), y las tendencias a formar agregados por parte de las regiones codificantes, al usar el IHA para los genomas de: 1, *Salmonella sp.*; 2, *E. coli*; 3, *B. subtilis*; 4, *S. Aureus*; 5, *D. melanogaster*; 6, *N. crassa*; 7, *C. Elegans*; 8, *Chlamydia sp.*; 9, *N. tabacus*; 10, *G. Gallus*; 11, *X. Laevis*; 12, *A. Thaliana*; 13, *H. Sapiens*; 14, *R. norvegicus*. Tomado de Miramontes et al., 1995.



Dado que este estudio empleó un polímero homoquiral, podemos comenzar a sugerir que en este trabajo, al igual que el modelo matemático anteriormente referido, los resultados logrados son debidos fundamentalmente a la condición homoquiral existente en los ácidos nucleicos, y dado que dentro de éstos, sólo para el caso de las secuencias codificantes, que dan paso a otro tipo de polímeros que se integran a la estructura interna de los sistemas biológicos (los péptidos), manteniendo la red y la integridad interna de los organismos, en el sentido en que la teoría de la autopoiesis lo señala, podemos además añadir, ya que estas regiones del genoma (los exones) son las que contienen la información para sintetizar elementos de la red autopoietica, que ésta condición homoquiral en el DNA es la base material para permitir a un polímero informacional, almacenar información. Es decir, comenzamos a sugerir con bases, la proposición de que la condición homoquiral permite a las moléculas quirales dentro de un polímero biológico, manifestar su propiedad de almacenaje de información, pues “*las propiedades de una cosa no surgen de su relación con otras cosas sino que, antes bien, simplemente se activan en esa relación*” (Marx, 1872).

El tercer trabajo que nos sirve para sustentar nuestra propuesta de que la condición homoquiral en los elementos del sistema es el sustrato material para permitir un óptimo uso de la información, y que esto tiene como consecuencia la emergencia de la vida, es el

trabajo desarrollado por Carroll (2009), donde basado en la teoría de la información, éste autor propone una definición de vida en términos de homoquiralidad, proponiendo que “*vida es todo aquello que autorreproduzca un ambiente homoquiral*”; pues se basa precisamente en la teoría desarrollada por Shanon para elementos de un conjunto que contiene información, donde la cantidad de ésta que puede ser almacenada por una molécula (como los aminoácidos) tiene implicaciones importantes en cuanto a la cantidad de información espacial que puede ser contenida en moléculas de carbono quirales: al hacer los cálculos sobre la base a la entropía de Shanon, Carroll encuentra que la cantidad de información espacial que puede ser contenida por una molécula, con un centro quiral como el carbono, de manera individual es de 2 bits binarios; pero para moléculas con más de un centro quiral, la información en el espacio contenida en ellas aumenta en múltiplos de 2. Por su lado, debido a que cada aminoácido en una cadena peptídica tiene tres de sus grupos espaciales sin contribuir a la información, la cantidad de información que aportan es de 1 bit, y la cantidad de información errónea que puede ser transmitida (según el concepto de equivocación) es de 0.53 bit; por lo que la cantidad de información que cada aminoácido quiral formando parte de un péptido, puede transmitir es de 0.47 bit, donde para el caso de una mezcla racémica de ellos en la cadena es de cero. Por lo que un conjunto homoquiral de bloques de construcción es la manera más efectiva de transmitir información espacial. Además, Carroll encuentra que una reducción en la cantidad de esta información espacial es contrarrestada por un aumento en la cantidad de átomos que constituyan a la molécula aquiral o, en este caso, las moléculas de un péptido racémico, por lo que la condición homoquiral no sólo es útil para permitir un óptimo almacenamiento de información, sino para reducir al mínimo la cantidad de elementos moleculares empleados en la construcción de un polímero informacional, también.

Nuestra Propuesta

Estos trabajos nos sugieren que la condición homoquiral de los polímeros biológicos permite el almacenamiento y transmisión efectiva de información que sustenta la emergencia de la vida. Aquí es importante aclarar que cuando hacemos referencia a la emergencia de patrones, no nos referimos a la existencia de fenómenos inexplicables, ni mucho menos a la manifestación casi mágica de una dinámica o propiedad que aparece milagrosamente frente a nosotros cuando una relación entre elementos de un sistema se ha establecido, sin que alguien sepa o pueda saber por qué. Por el contrario, cuando nos referimos a la emergencia de patrones o de propiedades sustentadas por la dinámica dentro de un sistema, aún cuando en un momento inicial no se tenga entendida dicha dinámica, nos referimos a la existencia de tales propiedades emergentes, como producto de una dinámica que la soporta, la cuál, al llevarse a cabo por elementos materiales en interacción, puede ser objeto de estudio y es cognoscible, siempre y cuando no se aislen de la interacción los componentes del sistema.

Como hemos mencionado ya en la introducción de esta tesis, y ejemplificado en el anexo 1, tomando como ejemplo la manifestación efectiva de la magnitud del valor en una mercancía y su movimiento social para permitir que el mercado mundial emerja como una consecuencia del modo en que se desarrolla dicho movimiento (dinámica), estas propiedades emergentes sólo se manifiestan dentro de la relación que las soporta, no por la existencia independiente de ésta, sino porque los elementos que participan en dicha relación

son portadores de propiedades pasivas que se vuelven activas si se les coloca en interacción mutua.

Cuando uno mira o estudia un sistema que manifiesta cierta propiedad, éste se nos muestra como tal: como un sistema que manifiesta dicha cualidad aparentemente indisoluble a él, como los sistemas vivos que son capaces de almacenar y transmitir información; y no se nos muestra como lo que son: un conjunto de elementos en interacción dinámica que soportan dicha propiedad, insertados en un tipo peculiar de interacción por medio de la cuál se convierten en manifestantes colectivos de propiedades que comparten, para sustentar dicha propiedad emergente; del mismo modo que en la relación de valor entre una cantidad determinada de lienzo y una chaqueta se hace efectiva la propiedad de contener un valor, y donde ambas mercancías se vuelven equivalentes solamente como portadoras de éste, y la apariencia abotonada de una no es obstáculo para que la otra “*reconozca en ella un alma gemela afín* (por así decirlo): *el alma del valor*” (Marx, 1872), y en este tipo de relaciones cognoscibles, está basada la emergencia del mercado mundial.

Es así como elementos quirales, capaces de almacenar información como lo propuesto por Carroll (2009), para los aminoácidos, manifiestan efectivamente esta propiedad informacional solamente cuando entran en una relación definiendo un ambiente homoquiral dentro de un péptido. En otras palabras, estamos proponiendo que la capacidad de almacenar información en los sistemas vivos no es una propiedad definida posterior a la aparición de la vida, sino definida en un sistema prebiótico biogénico, por tal motivo, esta propiedad de almacenar información no flota libremente en el aire, sino que es soportada por un componente material dinámico, que define una relación peculiar en la interacción de los elementos que soportan dicha propiedad: los aminoácidos quirales, con un exceso enantiomérico inicial, son capaces de definir una dinámica fuera del equilibrio aún no conocida, susceptible a variaciones del medio externo, que favorece la condición homoquiral en las cadenas peptídicas y, por lo tanto y gracias a esta relación en un ambiente homoquiral entre los aminoácidos, la capacidad de almacenar información dentro de un sistema es manifestada, inicialmente permitiendo almacenar la información espacial (o estructural) de la configuración tridimensional del péptido que es capaz de mantener cierta integridad (resistir), ante variaciones del medio circundante para, en un paso posterior y ya dentro de un sistema vivo muy básico, transferir esta información estructural de resistencia contenida en los péptidos, a los ácidos nucleicos (al RNA), dando paso a la aparición de la bioinformación, que contiene el tipo de información “expediente”, que permite almacenar las distintas configuraciones estables de la red en el sistema, dependiendo de las condiciones ambientales en que se desarrolla.

De este modo, la propiedad de optimizar el uso de la información en un polímero homoquiral surge de la naturaleza de sus elementos constituyentes (monómeros quirales); y al contrario, la condición homoquiral de los polímeros informacionales biológicos no surge, o no deriva, de la existencia independiente de la propiedad de almacenar y transmitir información. Así, los resultados del modelo matemático y el IHD demuestran la existencia de una dinámica incipiente contenida en los polímeros homoquirales, presentes en los sistemas biológicos (en su caso, en los ácidos nucleicos); la cuál emerge haciendo robustas las dinámicas contenidas de manera potencial en sistemas abióticos con capacidad biogénica, cuando estos sistemas son capaces de optimizar el uso de la información. Por lo

tanto, teniendo en cuenta que la organización de la materia en los sistemas se da cada vez en organizaciones más complicadas, desde las partículas elementales organizadas en los átomos, éstos en moléculas, macromoléculas, etc.; podemos citar nuevamente el trabajo de Martínez-Mekler *et al.* (1996) donde afirman: “[...] *en tal sentido, la vida es más una necesidad que cuestión de suerte*”.

Propuesta de Protocolo

ANÁLISIS DE PATRONES EN LA ORGANIZACIÓN INTERNA DE GENOMAS Y SECUENCIAS DE PROTEÍNAS VARIANDO SUS CONDICIONES DE HOMOQUIRALIDAD, POR MEDIO DEL USO DE ECUACIONES MATEMÁTICAS.

Con la evidencia bibliográfica que hemos presentado aquí para sustentar inicialmente nuestra teoría de que la condición homoquiral en los polímeros informacionales es una condición necesaria para permitir la autoorganización de los componentes moleculares en los polímeros de un sistema vivo, debido a que le permite manifestar efectivamente su capacidad de almacenar información; representa una inicial aproximación a la teoría. Por tal motivo, no tenemos por el momento más evidencia que estos resultados bibliográficos, los cuales al reinterpretarlos dentro de nuestra idea, nos dan un primer fundamento y herramientas para buscar nuevo respaldo.

Nosotros partimos de la idea de que la condición homoquiral permite que los ácidos nucleicos manifiesten su propiedad de ser polímeros portadores de información, y que en general esta homoquiralidad permite el establecimiento visible (y dinámico) de esta propiedad, al asociarse elementos moleculares portadores de información conformando un polímero informacional, incluyéndose aquí también a los péptidos. Esta inclusión de los péptidos a los polímeros biológicos capaces de almacenar información, ha sido considerada por diversos investigadores (por ejemplo: Carroll, 2009; Kompanichenko, 2008; Shapiro, 2007; Maury, 2009; Ogayar y Sánchez-Pérez, 1998), haciendo la pertinente aclaración de que la información contenida en las cadenas peptídicas es espacial, mientras que la contenida en los ácidos nucleicos es del tipo “expediente” (pues permite almacenar una cantidad de información que puede ser empleada o no, dependiendo del ambiente externo y del momento en el ciclo biológico de un organismo). De este modo, y al ser las cadenas polipeptídicas homoquirales, extendemos el papel de la homoquiralidad a una condición general por medio de la cual pueden organizarse estos elementos moleculares portadores de información, y hacer manifiesta esta propiedad en el polímero, como ya lo hemos presentado durante la definición de nuestra teoría que hemos denominado “Propuesta 2”, en esta tesis.

Esta idea original que proponemos, nos permite enfatizar que la condición homoquiral, no importando la serie quiraral a la que favorezca, es una condición fundamental para el establecimiento y desarrollo de un sistema biogénico. Para probarla, necesitamos variar la homoquiralidad tanto en los genomas de organismo reales, como en sus cadenas peptídicas. Sin embargo, esta variación en los sistemas vivos topa con el problema de que todo el organismo se encuentra conformado sobre la base de los L-aminoácidos proteinogénicos y las D-ribosa y D-desoxirribosa de los ácidos nucleicos; y dado que los sistemas vivos son

sistemas complejos, modificar únicamente estas propiedades simétricas desajusta el sistema, no pudiendo asegurar que las consecuencias observadas posteriores a nuestras modificaciones quirales, sean debidas solamente a ellas. Por este motivo, los protocolos experimentales, que logren poner a prueba nuestra idea, deberán prescindir en los momentos actuales del organismo vivo, y analizar los patrones que se generen en estos polímeros de manera aislada, en cuanto a su organización y dinámica, conforme se modifican las condiciones quirales de su estructura.

Para este efecto, la mejor manera de hacerlo es mediante la caracterización de genomas y proteomas de organismos reales tomados como secuencias numéricas, y emplear tanto el IHD como el modelo matemático desarrollado por Aldana-González *et al.* (2003). De este modo, la teoría que proponemos se muestra como un aporte útil y novedoso para “nutrir” el debate sobre los requerimientos mínimos para que un sistema vivo sea considerado como tal, apoyando este criterio de la condición homoquiral inicialmente introducido por Carroll (2009), y definido por nosotros en términos de autoorganización de la materia.

A continuación, un preliminar protocolo experimental, basado en el empleo de dos ecuaciones matemáticas, es propuesto; haciendo la aclaración pertinente de que aún falta por desarrollar un modo en cómo escribir los genomas y secuencias de proteínas tomados de las bases de datos (GenBank y bancos de expresiones protéicas en organismos), el cuál permita representar las condiciones homoquirales dextrógira y levógira, de manera mutuamente independiente, además de la condición racémica y sus intermedios entre ambos extremos. Pese a esto, se presenta el siguiente protocolo como un aporte de la presente tesis:

1.- Hipótesis Experimental.

Si la condición homoquiral en los polímeros biológicos capaces de almacenar información, es la condición necesaria para que el sistema se organice y manifieste así esta propiedad; entonces el análisis de la organización interna de genomas y proteomas de organismos reales mostrará patrones (equivalentes y simétricos) de organización tanto para las condiciones homoquirales dextrógira como levógira al graficarlos mediante el IHD y patrones dinámicos equivalentes al emplear el modelo matemático de la dinámica ribosomal prebiótica (Aldana-González *et al.*, 2003), del mismo modo que éstos desaparecerán al emplear estas mismas secuencias pero reescritas en la forma racémica.

2.- Objetivos.

- i) Identificar patrones de organización equivalentes cuando se emplean secuencias genómicas exogénicas y proteómicas escritas tanto en la forma D-homoquiral como en la forma L-homoquiral, al emplear el IHD y el modelo matemático de la dinámica ribosomal prebiótica.
- ii) Identificar un nulo patrón de organización en las secuencias genómicas exogénicas y proteómicas escritas de forma racémica, al emplear el IHD y el modelo de la dinámica ribosomal.

iii) Identificar una tendencia a ganar orden y robustecer patrones en las secuencias genómicas exogénicas y proteómicas analizadas con el IHD y el modelo de la dinámica ribosomal prebiótica, conforme se tiende a ambas condiciones homoquirales partiendo de las secuencias escritas para la condición racémica.

3.- Materiales y Método.

3. 1.- Condiciones iniciales.

Habiendo definido un modo de escribir las secuencias genómicas y de proteínas tomadas de bases de datos (GenBank y bancos de expresión de proteínas), de organismos representativos de los diferentes *phyla*, tanto para la condición homoquiral dextrógira como para la condición homoquiral levógira, así como para la condición racémica en estos polímeros, y asegurándose de que dichas escrituras son independientes unas de las otras, es decir, que al escribir una y emplearla para el análisis, el resultado de las demás no esté determinado por ésta (escritura aún no definida en este trabajo); se emplearán tanto el Índice de Homogenidad del DNA como el modelo matemático que emula una dinámica ribosomal prebiótica (Aldana-González *et al.*, 2003), para buscar cambios en los patrones de organización de estas secuencias.

De este modo, el uso de las secuencias de organismos que proponemos, con fines de poder comparar nuestros resultados, son aquellas de los mismos organismos empleados por Miramontes *et al.* (1995) para el IHD, y Aldana-González *et al.* (2003) para el modelo matemático. Definiendo así dos condiciones experimentales para buscar, en una, cambios en la organización termodinámica de las secuencias al variar las condiciones quirales de éstas (IHD); y en la otra, cambios en los patrones de la dinámica de las secuencias, al variar igualmente sus condiciones de quiralidad (modelo matemático).

Para el caso de las secuencias genómicas, del mismo modo que los trabajos ya desarrollados, se dividirán en intergénicas y exogénicas (para el caso de los eucariontes; para los procariontes se utilizará el genoma completo), donde se busca tener resultados similares a los ya reportados pero empleando la escritura de las secuencias que se desarrolle propiamente para describir ambas condiciones homoquirales y la racémica. Para el caso de las secuencias protéicas, tanto las escrituras homoquirales y la racémica, como la definición de los valores que se van a introducir a las ecuaciones matemáticas, serán definidas de manera original, basándose en las propiedades de los aminoácidos de ser polares o apolares, con carga o sin carga, y aromáticos o no aromáticos; ingresando aquí los valores de las cadenas peptídicas así escritas.

3. 2.- Índice de homogenidad del DNA.

Con las secuencias genómicas exogénicas y protéicas escritas en forma D-homoquiral y L-homoquiral, serán obtenidos los valores del IHD para cada organismo. Estos valores serán graficados en el espacio Ω , obteniendo espacios vectoriales separados para cada condición: uno para las secuencias D-homoquirales y otro para las L-homoquirales. Ambos patrones de distribución sobre el espacio geométrico Ω serán comparados entre sí y con los resultados reportados por Miramontes *et al.* (1995) para las regiones exogénicas.

Lo propio será realizado para las regiones genómicas intergénicas: los valores para el IHD serán obtenidos con las escrituras D- y L- homoquirales, graficados en Ω y comparados con lo reportado por Miramontes *et al.*, para el caso de las secuencias intergénicas.

Por otro lado, las secuencias genómicas exogénicas y protéicas escritas en la forma racémica, serán empleadas de igual modo para obtener los valores del IHD y graficarlos en Ω , para compararlos con los resultados obtenidos para las condiciones D- y L- homoquirales de las mismas secuencias, obtenidos anteriormente.

Las secuencias genómicas intergénicas escritas en la forma racémica serán empleadas para seguir el mismo procedimiento: obtener los valores del IHD, graficarlos y compararlos con los resultados obtenidos con estas mismas secuencias escritas en las formas D- y L- homoquirales anteriormente empleadas.

Por último, y si los resultados hasta aquí obtenidos lo avalan, los pasos anteriores descritos serán nuevamente desarrollados pero en esta ocasión, empleando escrituras de todas las secuencias usadas variando entre los extremos ya probados (condición racémica y homoquirales D- y L-), en distintos niveles de homoquiralidad al mezclar las escrituras homoquirales y racémica dentro de las secuencias. Estos resultados serán comparados entre sí, y con los extremos anteriores ya usados.

3. 3.- Modelo matemático de la dinámica ribosomal prebiótica.

De manera análoga al análisis con el IHD, las secuencias genómicas exogénicas y protéicas escritas en las formas D- y L- homoquirales serán ingresadas al modelo matemático y se obtendrán los valores del valor más probable de separación entre mínimos de interacción consecutivos. Estos valores serán comparados con los obtenidos por el grupo de trabajo de Aldana-González *et al.* (2003), para las secuencias exogénicas de los mismos organismos utilizados, y se ampliará a otros.

Con las secuencias genómicas intergénicas escritas tanto en la forma D- como en la L- homoquiral, se obtendrán también los valores de la mayor probabilidad en la separación de mínimos de interacción consecutivos. Estos valores serán comparados tanto con los reportado por Aldana-González *et al.*, como con los obtenidos para las regiones exogénicas anteriormente obtenidos.

Para el caso de las regiones genómicas exogénicas y protéicas escritas en la forma racémica, el procedimiento será el mismo, obteniendo el valor de la probabilidad mayor en la separación de mínimos de interacción consecutivos, y comparándolos con los resultados obtenidos para las mismas secuencias escritas en las formas homoquirales D- y L-.

Con las secuencias genómicas intergénicas escritas en la forma racémica, nuevamente el valor más probable de la separación de mínimos consecutivos será obtenido y comparado con los mismos valores calculados anteriormente para estas regiones escritas en la forma D- homoquiral y L- homoquiral.

Finalmente, las mismas secuencias con los mismos niveles de homoquiralidad que las usadas para la parte final en el IHD, serán también empleadas para repetir el procedimiento ya descrito para este modelo matemático.

4.- Posible Análisis y Resultados Esperados.

Tanto para los valores graficados por medio del IHD, como para los valores de la probabilidad mayor de la distribución de mínimos consecutivos obtenidos mediante el modelo matemático, el análisis para someter a prueba nuestra hipótesis será el de comparar entre los resultados obtenidos para cada condición (homoquirales D- y L-, racémica, y niveles intermedios de pureza quiral): para el caso del IHD, una comparación en la distribución de los valores en Ω será realizada; y para el caso del modelo, se realizará la comparación entre los valores numéricos obtenidos.

De este modo, esperamos obtener puntos en el espacio Ω igualmente distribuidos para las secuencias intergénicas de los genomas tanto para los casos racémico, homoquiral (tanto D- como L-), y los reportes de Miramontes *et al.*, por lo que todos estos valores se espera que formen parejas ordenadas que se distribuyan sobre el origen de Ω . Del mismo modo, los valores obtenidos mediante el modelo matemático para estas secuencias en las condiciones racémica, homoquiral (D- y L-), y lo reportado por Aldana-González *et al.*, se espera que sean los mismos: que la distancia de separación entre mínimos consecutivos más probable sea de 2 monómeros.

Se espera que los resultados sean los mismos que para las regiones intergénicas mencionadas en el párrafo precedente, para las secuencias genómicas exogénicas y protéicas escritas en la forma racémica.

Por el contrario para las secuencias exogénicas y protéicas escritas en las formas D-homoquiral y L-homoquiral, se espera que presenten resultados similares a los reportados tanto para el caso del IHD como para el modelo matemático empleando en ellos las secuencias codificantes (exogénicas), de los genomas por estos grupos de trabajo usados. De este modo, se espera que los puntos en Ω para estas secuencias se distribuyan alejados del origen y que, además, entre las formas D- y L- homoquirales exista una simetría, ya sea con respecto al eje x, o con respecto al eje y del espacio geométrico; mientras que para el modelo matemático, se espera que el valor de la probabilidad mayor de la distancia entre mínimos consecutivos sea de 3 monómeros, para ambas condiciones homoquirales.

Finalmente, y siguiendo la lógica de los resultados que esperamos obtener, sugerimos que debe esperarse que cuando se emplean secuencias intergénicas con diferentes niveles de pureza quiral, los resultados no sean distintos a los ya mencionados para los intrones en forma homoquiral o racémica, tanto para el IHD como para el modelo matemático. Caso contrario cuando sean empleadas las secuencias de exones y las protéicas: se espera que conforme la pureza quiral aumente, los resultados obtenidos mediante las dos ecuaciones (IHD y modelo matemático), se aproximen más a los valores obtenidos en éstas al emplear las escrituras homoquirales (parejas ordenadas alejadas del origen de Ω , y valores de 3 monómeros como la distancia más probable de separación entre mínimos consecutivos); y

que conforme la pureza quiral disminuye, los valores arrojados por las ecuaciones tiendan a igualar los valores arrojados mediante el uso de las secuencias racémicas antes probadas.

5.- Posibles Interpretaciones.

Si los resultados esperados fueran correctos, y en efecto fueran obtenidos, entonces la confirmación de nuestra hipótesis y, por tal, de nuestra teoría, sería lograda, pudiendo asegurar que el hecho de que las secuencias intergénicas, sin importar su condición homoquiral o racémica, ni su nivel de pureza óptica, no muestran un tipo de organización especial debido a que en estas no se encuentra contenida la información necesaria para constituir la red autopoietica de un sistema biológico. Lo cual no significa de modo alguno que cada monómero en particular no tenga la capacidad de almacenar información, sino simplemente que dentro de su organización en la secuencia genómica, ésta no adquiere un orden particular para almacenar información relevante para el sistema y esta capacidad informacional no es manifestada efectivamente.

Para el caso de las secuencias genómicas exogénicas y las protéicas escritas ambas en la forma racémica, lo mismo puede ser afirmado: que pese a que estas secuencias en un contexto biológico, sí presentan la capacidad de almacenar información relevante para el organismo, al presentarse de modo racémico, esta capacidad informacional no puede ser manifestada efectivamente, aún cuando no desaparezca ésta de las bases nitrogenadas ni de los aminoácidos de manera individual (según el caso), pues simplemente esta propiedad no se activa dentro de la relación entre estos elementos moleculares.

De manera importante para nuestro trabajo, la confirmación de que tanto las secuencias genómicas exogénicas como las protéicas escritas ya sea de la forma D-homoquiral o de la forma L-homoquiral arrojan valores equivalentes pero simétricos entre cada condición, al emplear las dos ecuaciones aquí propuestas, nos permitiría asegurar con bases ya experimentales que la condición homoquiral en los polímeros con capacidad de almacenar información en los sistemas biológicos, es una condición fundamental y necesaria para permitir la autoorganización interna del sistema, y permitir que dicha capacidad de almacenar información contenida en cada uno de los elementos moleculares de manera individual, se manifieste de manera dinámica y efectiva como una propiedad colectiva del polímero biológico (péptidos y ácidos nucleicos).

Por su parte, si se obtienen los resultados ya considerados para el caso de las secuencias intergénicas escritas de diferentes formas intermedias de pureza quiral, la similitud de los resultados con las secuencias aleatorias y las intergénicas reportadas por Miramontes *et al.*, y Aldana-González *et al.*, nos ayuda a demostrar que la homoquiralidad en los polímeros biológicos capaces de almacenar información no conduce invariablemente a que esta capacidad informacional se exprese de manera explícita en ellos; por el contrario, es evidencia de que ésta es solamente una condición necesaria para favorecer la organización interna de estos sistemas, por medio de la cual, la capacidad de almacenar información puede o no ser expresada dinámica y efectivamente. Lo que se vería corroborado al emplear las secuencias escritas también de diversos modos intermedios de pureza quiral, usando las secuencias exogénicas y protéicas, pues éstas secuencias, al contener información relevante para el sistema biológico al cuál pertenecen, sin modificar otro parámetro en su estructura

interna que la pureza quiral en ellos, podríamos poner de manifiesto que el orden o la dinámica que pueda ser evidenciada en su estructura por medio de su estudio con ambas ecuaciones matemáticas, se pierde o se tiende a igualar en ellos según se alejen o tiendan a su condición homoquiral inicial.

*

VI. DISCUSIÓN

Durante el desarrollo de la presente tesis, dos teorías propuestas han sido desarrolladas y expuestas aquí: la primera es la hipótesis que trata de la búsqueda de nanotubos quirales de carbono como evidencia de la presencia de un sustrato asimétrico sobre la superficie de las condritas carbonáceas, como un escenario alternativo a la LPC para justificar los excesos enantioméricos encontrados en los aminoácidos meteoríticos, al definir una interacción heterogénea entre el sustrato y los aminoácidos. La segunda es la de que la condición homoquiral permite a los polímeros informacionales manifestar y hacer efectiva esta propiedad de almacenar información, y sustentar la dinámica de los sistemas vivos.

De este modo, discutiremos a continuación estos dos principales planteamientos teóricos iniciando con la hipótesis de la condición homoquiral como la base material para permitir un óptimo uso de la información en los sistemas potencialmente biogénicos, y finalizando con la discusión de la plausibilidad y conveniencia de considerar un sustrato asimétrico de nanotubos quirales de carbono, presente en las condritas carbonáceas como fuente de asimetría para inducir la ruptura espontánea de la simetría en mezclas racémicas de varios tipos de aminoácidos.

Muchos argumentos consideran el origen de la quiralidad biológica como una consecuencia del carácter “oportunista” de la vida iniciado por un aporte asimétrico de moléculas orgánicas de origen extraterrestre. De este modo, quienes consideran que la condición homoquiral fue previa a la aparición de la vida, argumentan que esto sucedió así debido a que el aporte cósmico asimétrico de moléculas orgánicas, era de tal magnitud que resultó “conveniente” para la consolidación de los primeros sistemas biológicos. Para quienes consideran que la condición homoquiral de los seres vivos fue una propiedad definida posteriormente a la aparición de la vida, producto de la evolución de los sistemas biológicos, argumentan que esto sucedió debido a que el exceso enantiomérico de moléculas orgánicas proveniente del espacio exterior, creó una mayor abundancia de ciertos enantiómeros (en particular, de L-aminoácidos provenientes de meteoritos), lo que los primeros seres vivos “aprovecharon” para integrarlos a su estructura y dinámica interna; es decir, aprovecharon la oportunidad de emplear los recursos moleculares más abundantes, debido a este carácter “oportunista”. A pesar de que existen argumentos válidos para quienes consideran que la condición homoquiral sucedió posteriormente al origen de la vida, la evidencia y hallazgos de excesos enantioméricos presentes en sistemas extraterrestres, es decir, los excesos L-enantioméricos encontrados en los α -aminoácidos meteoríticos, y el hecho de que este exceso asimétrico se da en el mismo sentido que el observado para los aminoácidos proteinogénicos en los sistemas vivos, soportan el argumento de quienes consideran la condición homoquiral como previa a la aparición de la vida, validándose a su vez la frecuencia de este fenómeno asimétrico en el Universo, en moléculas de importancia biológica al ser claro que estos excesos de L-aminoácidos en las condritas carbonáceas se debe a procesos puramente abióticos, y presentes en el medio interestelar desde los orígenes mismos del Sistema Solar.

Sin embargo, este criterio que determina la importancia de la condición homoquiral como una necesidad para el surgimiento de la vida, basado en el mero argumento del carácter “oportunista” de la vida, no da una explicación clara de las ventajas de este “oportunismo”,

además de la ventaja obvia de que si hay mucho de algo, es más fácil usarlo en lugar de usar un recurso menos abundante, lo cuál efectivamente sucede, pues los organismos vivos actuales emplean los recursos energéticos más abundantes en su medio circundante en lugar de los menos abundantes. Es así como el carácter oportunista de la vida se nos muestra incompleto al no explicar de qué modo el ser oportunista permite el ordenamiento interno de un sistema biogénico (o si esto se da por accidente), y la emergencia de la dinámica biológica. Por lo tanto, pensar el problema dentro del contexto de los sistemas complejos puede ayudar a comprender mejor el fenómeno, al proporcionar una explicación posible de cómo la existencia de un recurso más abundante permite el establecimiento de interacciones entre elementos de un sistema basados principalmente en este recurso abundante, al existir una mayor cantidad de posibles interacciones que puedan establecerse donde éste participa. En tal sentido, deben buscarse las evidencias que justifiquen la emergencia de la dinámica biológica (de la vida) como una consecuencia del dinamismo en la interacción de elementos dentro de un sistema.

Haciendo un breve resumen de las evidencias bibliográficas descritas en esta tesis que validan nuestra teoría, tenemos que han sido presentados los cálculos hechos por Carroll (2009), basado en la entropía de Shanon, los cuáles le llevan a concluir que las moléculas quirales son capaces de almacenar y transmitir una mayor cantidad de información que aquellas que no son quirales; y además encuentra que si estas moléculas quirales se agrupan en conjuntos homoquirales, la cantidad de información que puede contener y transmitir el conjunto es mayor que la contenida en aquellos que definen ambientes racémicos. Este resultado, aunado con el presentado por Aldana-González *et al.* (2003) sobre el modelo matemático que permite simular las dinámicas de interacción electrostática entre una partícula cargada desplazándose sobre un polímero, y que define la presencia de mínimos de interacción consecutivos, separados unos de otros cada 3 monómeros al recorrer el polímero, cuando esta dinámica es simulada empleando secuencias codificantes de genomas reales de organismos, es decir, cuando el modelo emplea secuencias biológicas que contienen información referente a elementos que se integrarán a la red en los sistemas vivos, el modelo obtiene resultados análogos a la dinámica observada en los organismos vivos, como lo es el codón de tres monómeros para la dinámica ribosomal. Además, los resultados encontrados con el Índice de Homogeneidad del DNA, propuesto por Miramontes *et al.* (1995), donde muestra que los genomas de organismos reales en sus secuencias codificantes, exhiben una estructura termodinámica alejada del equilibrio, es decir, con un orden específico que se diferencia claramente de las regiones no codificantes o de las secuencias azarosas generadas por computadora, las cuáles no presentan un orden específico y tienden a agruparse cerca del origen en el espacio geométrico Ω , sugiriéndonos nuevamente que en estas regiones, que contienen información para codificar los elementos moleculares que se integrarán a la red de interacción en los sistemas vivos, se presentan patrones recurrentes que se hacen verificables cuando esta información necesaria para construir la red de los sistemas biológicos es contenida en ellas, pues estos patrones no son constantes en todo el genoma dado que las secuencias no codificantes presentan comportamientos similares a los observados en secuencias azarosas, evidenciándose que en este caso, dichos patrones no son manifestables.

Con estos resultados, el argumento del carácter oportunista de la vida resulta insuficiente, pues existen dinámicas incipientes, comunes a los sistemas vivos y no vivos, que pueden

manifestarse y robustecerse en los sistemas vivos que contienen información. Por lo tanto, y si nos basamos en estos resultados, podemos sugerir la emergencia de estas características biológicas precisamente como tales: como propiedades que emergen una vez que se ha logrado establecer una dinámica de interacción entre los elementos moleculares que la definen, producto de patrones incipientes que encuentran su consolidación y se vuelven conspicuos cuando la red de interacción ha logrado almacenar información de sí misma y del ambiente exterior en el cuál se desarrolla, emergiendo la dinámica de los sistemas vivos, en donde algunos ejemplos son el codón de tres monómeros y la distribución (la arquitectura) alejada del equilibrio de las regiones codificantes del DNA. Esta emergencia de la dinámica biológica es el resultado de la manifestación de propiedades naturales inicialmente no conspicuas, pero potencialmente presentes en elementos de un sistema, que se hacen manifiestas y verificables sólo cuando existe la relación entre elementos que comparten dichas propiedades; no se trata de un hecho mágico existente por sí mismo que se manifiesta, gracias a su divinidad, en un sistema al cual le otorga sus propiedades.

Esto, del mismo modo que el ejemplo dado para el caso de una mercancía expuesto en el anexo 1, se da en el sentido de que las propiedades emergentes soportadas por un sistema no son manifestaciones inexplicables de fenómenos existentes sin un sustento material en el Universo, sino la emergencia de propiedades novedosas, originadas por componentes materiales portadores de propiedades que se encuentran inicialmente ocultas cuando éstos se encuentran fuera de alguna relación de interacción, y que las hacen efectivas sólo cuando establecen alguna dinámica de interacción entre ellos, del mismo modo que la propiedad física de la pesantez en un cuerpo sólo puede ser conocida mediante la interacción con otros cuerpos que comparten dicha propiedad: uno no es capaz de conocer el peso de un objeto si se le aísla de toda interacción con el entorno, por lo que el peso de dicho objeto se encuentra en tales condiciones oculto; sus propiedades de tener peso sólo se hacen manifiestas cuando dicho objeto interacciona con otro distinto, con el que comparte dicha propiedad, desplazando hacia un lado u otro la balanza con la que son comparados. Esta propiedad de tener peso no es, pues, un milagro, sino la manifestación observable y verificable de la pesantez que actúa sobre un cuerpo, la cuál sólo se hace efectiva mediante la relación de interacción con otro cuerpo con el cual la comparte, y la cual puede originar y sustentar propiedades emergentes como el intercambio entre objetos variados en proporciones iguales, definidas por su peso.

El presentar estos resultados no solamente nos permite mostrar que pueden emerger patrones, o hacerse robustos aquellos que ya se encuentran presentes de manera incipiente, basados en la manera en cómo se organizan las secuencias genómicas codificantes, con respecto a las no codificantes y a las secuencias azarosas, sino que nos da la evidencia de que, estando presente en estas regiones exogénicas la información necesaria para construir la red dentro de los sistemas biológicos, la manera en cómo se organiza el material genético a causa de esta información contenida en estas regiones, permite la robustez de los patrones encontrados en los trabajos antes referidos, dentro del contexto de la dinámica de los sistemas vivos. Esto, a su vez, nos permite comenzar a sugerir que, siendo el genoma una macromolécula homoquiral, ésta condición asimétrica es la base material para permitir la emergencia de una propiedad fundamental para la vida: el almacenamiento y posterior transferencia de información, tanto ambiental, como de su propia estructura. Por tal motivo, la historia de la consolidación de un ambiente homoquiral en los polímeros informacionales

y la historia de la capacidad de almacenar y transmitir información, están contenidas en la misma historia de la evolución biológica.

Una vez teniendo una estructura de interacciones dinámica entre los componentes moleculares de un sistema que son capaces de almacenar y transmitir información, la dinámica de la vida puede emerger sobre la base de dicha red cuya propiedad fundamental es la del flujo de información entre sus elementos y la extracción de ésta del medio externo; siendo la condición homoquiral dentro de un sistema, la condición clave que permite que lo anterior suceda.

No está de más aclarar que la condición homoquiral dentro de un sistema no es una propiedad emergente, sino una condición fisicoquímica provocada por la acción de causas asimétricas influyendo sobre los elementos de un sistema, y que el evento previo para generar una condición homoquiral en un sistema es una ruptura espontánea de la simetría, la cuál sea capaz de generar un inicial exceso enantiomérico. Por tal motivo, el problema del origen de la condición homoquiral en los sistemas biológicos se sitúa en el origen de un exceso enantiomérico inicial, y éste a su vez, en el problema de la ruptura espontánea de la simetría, la cual comúnmente es considerada que bajo ciertas condiciones hace inestable la condición racémica en un sistema, y saca del equilibrio a éste para que adopte un orden; sin embargo, nosotros consideramos aquí una condición inicial aquiral, en el sentido de que no suponemos la pérdida de estabilidad a partir de una mezcla racémica, sino un ambiente de reacciones químicas inicialmente aquiral (como la síntesis de aminoácidos por la vía de Strecker), que ante la presencia de una fuente quiral asimétrica (como un sustrato quiral), los productos de dichas reacciones pierden su simetría y son sintetizados con un exceso enantiomérico inicial. Este exceso enantiomérico inicial bien puede ser amplificado hasta valores elevados y, tras esta dinámica fuera del equilibrio, permitir la condición homoquiral y el establecimiento de una red capaz de almacenar información que posibilite la emergencia de la vida a partir de este tipo de sistemas.

Como se ha mencionado ya en esta tesis, los dos tipos de polímeros homoquirales presentes en los sistemas vivos son, por un lado, los ácidos nucleicos: RNA y DNA, constituidos por D-ribosa el primero, y D-desoxirribosa el segundo; y por el otro lado, los péptidos, constituidos por L-aminoácidos. Dados estos dos tipos de polímeros, la búsqueda de los procesos que den origen a una ruptura espontánea de la simetría se ha basado en aquellos que puedan generarlo en estas macromoléculas de importancia biológica. Además, gracias a los ya referidos hallazgos hechos en las condritas carbonáceas de excesos L-enantioméricos en los aminoácidos meteoríticos, la idea de que el primer sistema potencialmente biogénico, que fue capaz de romper la simetría quiral e iniciar una dinámica fuera del equilibrio, fue un sistema prebiótico basado en los péptidos ha sido reforzado, además de los argumentos que apelan a la mayor estabilidad termodinámica de estructuras peptídicas como la β -amiloides con respecto a los ácidos nucleicos (y en particular el RNA; Ogayar y Sánchez-Pérez, 1998; Maury, 2009), o aquellos que recurren al cálculo combinatorio y argumentan que, teniendo menor cantidad de átomos las moléculas de aminoácidos que las de nucleótidos, se requiere de un menor número de “ensayos” o “intentos” para conseguir un arreglo espacial de tal modo que funcione para permitir la emergencia de la dinámica de la vida (Shapiro, 2007), que en el contexto de esta tesis, en primera instancia significa obtener un arreglo de los átomos dentro de la molécula que confiera al sistema que integren la

propiedad de ser quirales para, posteriormente, conferirle la capacidad de almacenar y transmitir información dentro de una asociación homoquiral de ellas.

Con esta idea de la capacidad potencialmente biogénica de los péptidos, y el hecho de la ruptura espontánea de la simetría en los aminoácidos a favor de la serie quirale levógira sobre las superficies de meteoritos, los procesos relevantes para el origen de la vida se sitúan no de manera exclusiva actuando sobre la Tierra, sino como procesos y mecanismos presentes en el espacio interestelar, y no sólo particulares al Sistema Solar, ni a un pasado o a un momento temporal exclusivo y aislado en el Universo; sino a procesos que actualmente se encuentran presentes en la Galaxia, pues el meteorito Murchison (en septiembre) y el Allende (en febrero) cayeron ambos en el año de 1969. De la misma manera en que han impactado la superficie terrestre estas condritas carbonáceas, y han depositado sus componentes moleculares sobre el planeta en el tiempo actual, este depósito de moléculas orgánicas durante el periodo de acreción de la Tierra recién formada, y su concomitante aporte de L-aminoácidos, bien pudo ser determinante para el ambiente químico prebiótico sobre el planeta que habitamos, del mismo modo que pudo o puede aún serlo para otros planetas de otros sistemas planetarios similares al nuestro. Por tal motivo se ha buscado un mecanismo que pueda actuar en el medio interestelar, provocando la ruptura espontánea de los aminoácidos sobre la superficie de meteoritos. Así, como se ha hecho resaltar en el presente trabajo, las explicaciones más aceptadas son aquellas que consideran escenarios interestelares con fuentes de asimetría, que si bien favorecen la serie quirale L en los aminoácidos, estos procesos no tienen por qué restringirse a esta quiralidad, pues la serie quirale a la que favorezca esta ruptura espontánea no es relevante, pues según lo que hasta ahora hemos intentado demostrar, lo realmente relevante es la condición homoquiral en un sistema, y no si ésta se da hacia la serie levógira o hacia la dextrógira. Por lo que la idea de la ubicuidad de estos procesos es aceptada y sustentada por las observaciones en los meteoritos.

Si resulta cierta la hipótesis propuesta en esta tesis de que la propiedad inicial de poder optimizar el uso de la información, tanto interna como externa de un sistema, es la detonante para sustentar la dinámica de los sistemas vivos, podemos así justificar el inicio de la condición homoquiral como una condición previa al origen de la vida, pues siendo las moléculas quirales, más aptas para almacenar y transmitir información, además de ser su asociación homoquiral en un sistema la más idónea para esto (Carroll, 2009), podemos argumentar que en el ambiente prebiótico, las diversas dinámicas entre los componentes moleculares establecían interacciones que definían ciertas redes, sensibles a las modificaciones ambientales. Ante el aporte extraterrestre de un exceso L-enantiomérico de aminoácidos, el ambiente químico prebiótico se vio influido por un componente asimétrico que afectó las redes moleculares y favoreció la aparición de otras. Al ser los sistemas racémicos menos aptos para almacenar información, con respecto a los sistemas homoquirales, las interacciones entre elementos para formar una red dentro de un sistema, permitió la selección sobre estos sistemas en el sentido de que los sistemas que definieron ambientes racémicos de aminoácidos, sólo podían lograr generar redes de interacción poco eficientes para manejar la información disponible, y no pudieron generar una versión de red de interacciones que fuera capaz de sustentar la dinámica biológica; mientras tanto, aquellos sistemas que definieron ambientes homoquirales, o por lo menos muy cercanos a esto, tuvieron mayores posibilidades de conseguir configurar una red que fuera capaz de

optimizar el manejo tanto de la información ambiental, como de la necesaria para configurar dicha red. Una vez consiguiéndolo, la aparición de la vida sobre estos sistemas fue una consecuencia. De este modo, la serie quiral de las moléculas, como los aminoácidos, que fue capaz de configurar esta red bien pudo ser D o L, importando únicamente que el sistema definiera un ambiente homoquiral, o con muy alta pureza óptica. Sin embargo, al existir una mayor cantidad de L-aminoácidos, es lícito argumentar que existieron mayores recursos para “probar” diferentes redes con una alta pureza enantiomérica, que las logradas con D-aminoácidos. Así, aún con todo y que la vida es un resultado impredecible de la dinámica y la evolución de la materia en el Universo, el establecimiento de un sistema biogénico, capaz de sustentar la dinámica inicial de los sistemas vivos, era prácticamente inevitable dado el ambiente en el cual se desarrollaban estas redes prebióticas, y no así un evento lleno de buena suerte y azar.

Esta condición homoquiral actual en los polímeros biológicos con capacidad de almacenar información, fue precedida por un inicial desbalance quiral en los sistemas prebióticos, muy posiblemente provocado por el aporte asimétrico de aminoácidos provenientes de meteoritos. Este aporte asimétrico de aminoácidos, proveniente de los meteoritos, es consecuencia a su vez de fuentes de asimetría actuando sobre el sistema para provocar una ruptura espontánea de la simetría, por lo que el problema de la aparición de los polímeros informacionales homoquirales se vincula directamente con el problema de la RES en mezclas racémicas de aa, sobre la superficie de condritas carbonáceas. Como ya se ha discutido con anterioridad en la propuesta 1 de este trabajo, el escenario más explorado para explicar esto es aquel que involucra fotorreacciones enantioselectivas, por medio de la irradiación de LPC proveniente de una estrella de neutrones. Si bien este escenario es suficientemente amplio para explicar los excesos enantioméricos observados en los meteoritos, plantea varios dilemas a resolver, como la necesidad de detectar la presencia de LPC-UV que pueda actuar sobre los aminoácidos, o siendo quizá el de mayor complicación el ya mencionado problema del dicroísmo circular, pues entre otras cosas, reduce drásticamente el número de aminoácidos capaces de ser integrados a un sistema homoquiral a aquellos que presenten el mismo signo del dicroísmo circular, dentro de la misma ventana espectral de la LPC-UV y rompan así su simetría hacia la misma serie quiral. Problema que probablemente puede ser resuelto con los escenarios que consideran la absorción quiroselectiva de enantiómeros sobre una superficie quiral, como es el caso de la presente tesis.

Considerando un escenario que involucra la absorción quiroselectiva sobre sustratos quirales, el dicroísmo circular no es un proceso que intervenga para originar excesos enantioméricos, sino que lo es la complementación espacial (complementación estereoquímica) entre un sustrato quiral y un enantiómero dado. Este cambio de escenario permite considerar un amplio conjunto de aminoácidos quirales, dado que lo fundamentalmente importantes es que uno de los dos enantiómeros sea absorbido de manera preferencial por la superficie quiral, y no que pueda degradarse o sintetizarse ante la presencia de LPC (lo que hace que en algunos aminoácidos, dado el dicroísmo circular, el enantiómero L sea favorecido y en otros sea el D). Esta complementación estereoquímica, al ser básicamente una complementación geométrica, la ruptura espontánea de la simetría no depende de características particulares para cada tipo de aminoácido, sino de la interacción espacial establecida entre la superficie quiral y las moléculas quirales;

donde esta interacción permite la autoorganización de los elementos sobre la superficie para permitir la emergencia de redes de interacción.

Si consideramos la síntesis abiótica de aminoácidos por rutas similares a la síntesis de Strecker, podemos considerar una condición inicial aquiral la cual, al ser un evento en el MIE convergente sobre la superficie de meteoritos con la existencia de un sustrato asimétrico constituido por nanotubos quirales de carbono formados en las regiones circunestelares, bajo la influencia de fuertes campos magnéticos y/o radiación sincrotrónica asimétricas de una sola quiralidad, podemos plantear este escenario interestelar para el origen de la asimetría en los aminoácidos presentando un contexto original basado en dos aportes novedosos de nuestra teoría, además del sustrato de nanotubos quirales de carbono: la no linealidad del fenómeno entre la síntesis de aminoácidos y la superficie quiral dentro de un mismo proceso, y por su parte, el considerar que la RES inducida por la acción del sustrato quiral no saca del equilibrio a una mezcla racémica inicial, sino que provoca la asimetría de la síntesis de los aminoácidos a partir de un ambiente aquiral.

Una vez rota la simetría en mezclas racémicas de aminoácidos sobre la superficie quiral, este exceso enantiomérico puede ser estabilizado y protegido de la radiación, retrasando, a su vez, el proceso de racemización. La presencia de este sustrato quiral sobre la superficie de meteoritos facilita también (teóricamente), el encuentro de enantiómeros de la misma quiralidad, promoviendo las interacciones entre aminoácidos en un ambiente asimétrico.

El hecho de que sobre las superficies meteoríticas no sea encontrada una dinámica biogénica que genere polímeros homoquirales, sino sólo un exceso enantiomérico inicial en los aa, no se debe a un error de nuestra propuesta de que la condición homoquiral es la base para sustentar la emergencia de la vida, sino que puede tratarse de la falta de un dinamismo como el propuesto en el concepto sistémico (Kompanichenko, 2008). Según este concepto, la vida debió haberse creado en un ambiente alejado del equilibrio, donde el dinamismo externo permitiera (o “forzara”) el dinamismo interno inicial en un sistema prebiótico al favorecer configuraciones o interacciones en los elementos de éste, y hacer a estas mismas inestables bajo otras condiciones ambientales, definiendo patrones periódicos que oscilan entre dos extremos y que permite a un sistema prebiótico generar interacciones o estructuras internas hasta que este dinamismo pueda ser mantenido por el mismo sistema al lograr una configuración en su interior capaz de contrarrestar los cambios externos periódicos; proponiendo de este modo, con base en datos geológicos (Kompanichenko, 2009), que un ambiente acuoso con oscilaciones de temperatura, pH, salinidad, concentración de iones y otros parámetros químicos, provoque la inestabilidad global del ambiente, como un potencial “nicho” para la aparición de un sistema biogénico, donde la media hidrotermal tenga cambios variados y defina un ambiente alejado del equilibrio. En esta media hidrotermal cambiante, las configuraciones internas logradas por los elementos moleculares de los diferentes sistemas serían estables en algunas temperaturas y demás condiciones, pero en otras no, por lo que nuevas configuraciones serían creadas y, por lo tanto, nuevas interacciones establecidas. Este dinamismo quizá no es el suficiente sobre las superficies de meteoritos en el espacio interestelar, como para provocar la dinámica interna de un potencial sistema biogénico, haciéndose necesaria la actividad geológica de un planeta.

En un ambiente relativamente estable, las configuraciones internas alcanzadas por los sistemas son también relativamente estables, y por lo tanto el número en la diversidad de redes de interacción establecidas se ve limitado en comparación de aquellas que pueden ser logradas en sistemas que se desarrollan en ambientes termodinámicamente cinéticos. Con esto, somos mesurados y aclaramos que no proponemos que la condición homoquiral en un sistema cualquiera, da como resultado ineludible la aparición de la vida; sino que mostramos que aún falta la interacción entre los elementos del sistema y la autoorganización de la materia para poder generar una red que permita optimizar el uso de la información y sustentar la incipiente dinámica biológica.

Así mismo, y a pesar de que las consecuencias son teóricas, esta RES sobre superficies quirales, aporta un escenario que requiere de menos particularidades que los considerados para las fotorreacciones asimétricas, como que no importa si existe una estrella de neutrones capaz de irradiar LPC-UV, ni si este tipo de radiación, y no la LPL-UV, sea la última a la que la mezcla de aminoácidos sea expuesta. Además, los problemas de la inestabilidad del ee se ven reducidos, así como la posible destrucción térmica de los aminoácidos al entrar alguna condrita carbonácea a la atmósfera de planetas parecidos a la Tierra. Y aunque este tipo de escenarios es amplio para cualquier superficie donde un sustrato quiral esté presente, los principales candidatos son los meteoritos, debido al descubrimiento del componente asimétrico orgánico macromolecular de quiralidad R, en la fracción insoluble de las condritas carbonáceas analizadas por Kawazaki *et al.* (2006), pues esto soporta nuestra propuesta y demuestra que existe un proceso asimétrico vinculado estrechamente con la química orgánica sobre la superficie de meteoritos. Pese a esto, aún falta por probar que este componente macromolecular de configuración R es en verdad un sustrato asimétrico, compuesto por nanotubos quirales de carbono; y más importante aún, resta probar que es capaz de provocar una síntesis asimétrica de aminoácidos al servir de superficie asimétrica donde condensan los productos de reacciones químicas aquirales similares a la ruta de Strecker, e inducir su ruptura espontánea de la simetría, necesaria para justificar el ee observado en las condritas carbonáceas.

Como se ha discutido ya, los nanotubos de carbono son macromoléculas potencialmente presentes en el medio interestelar; y a diferencia de los fullerenos o de otros componentes orgánicos macromoleculares, los nanotubos de carbono son capaces de inducir la absorción de moléculas orgánicas por medio de interacciones electrostáticas; además de poder definir así una especie de “rieles”, por medio de los cuales los L-aminoácidos pueden desplazarse y favorecerse así el reconocimiento entre aminoácidos de la misma quiralidad. En adición a esto, debido a que la quiralidad de los nanotubos de carbono está dada por el vector quiral con el cual una hoja de grafeno se pliega sobre sí misma, un fuerte campo magnético durante la formación de los nanotubos puede ser suficiente para generar la asimetría de este sustrato. De este modo, la búsqueda del sustrato quiral sobre las condritas carbonáceas se hace específico a la búsqueda de nanotubos quirales de carbono, ya sea por observación directa con el MFA o por métodos de obtención de nanotubos quirales para aislarlos de la fracción orgánica insoluble de las condritas carbonáceas sin alterar su quiralidad. Además, los protocolos experimentales también adquieren dirección, al poder diseñar experimentos que permitan obtener una RES sobre mezclas racémicas de aminoácidos o reacciones de síntesis aquiral de éstos en presencia de un sustrato de nanotubos quirales. Así, la hipótesis de la existencia de un sustrato de nanotubos quirales sobre la superficie de las condritas

carbonáceas permite comenzar a probar la validez de los escenarios que consideran la absorción quiroselectiva como el principal proceso que permite obtener excesos enantioméricos iniciales sobre los aminoácidos meteoríticos. La inicial búsqueda de ellos sobre las condritas carbonáceas puede hacerse empleando el MFA, como un primer método viable.

VII. CONCLUSIONES

- 1.- Es necesario obtener evidencia experimental de la presencia de nanotubos quirales de carbono sobre la superficie de condritas carbonáceas, además de probar que éstos se encuentran con una asimetría a favor de la serie quiral R (o D, si se emplea esta notación). Una vez confirmando esto, es necesaria aún la prueba experimental de que una superficie quiral de este tipo es capaz de provocar una ruptura espontánea de la simetría sobre la síntesis abiótica de aminoácidos, y que para todos los aminoácidos sintetizados, la misma serie quiral L de enantiómeros se ve favorecida.
- 2.- El método más directo e inmediato para probar la hipótesis aquí presentada, es la búsqueda de nanotubos de carbono quirales por medio de la observación directa de muestras de condritas carbonáceas empleando el microscopio de fuerza atómica. En términos idóneos, la revisión de las muestras empleadas por Kawasaki *et al.* (2006) en sus experimentos, donde reportan la presencia de excesos enantioméricos a favor de la configuración R, es preferible para la búsqueda de nanotubos R de carbono. Este método, aunque sencillo, evita protocolos que rodeen la búsqueda y hace a ésta directa y realizable en alguno de los laboratorios de la UNAM que cuentan con un MFA.
- 3.- La ruptura espontánea de la simetría sobre mezclas racémicas de aminoácidos meteoríticos puede ser el producto de la interacción entre las rutas químicas de síntesis de aminoácidos (síntesis de Strecker) y una superficie asimétrica constituida por nanotubos quirales de carbono.
- 4.- Considerar el origen de un exceso enantiomérico sobre los α -metilaminoácidos presentes en las condritas carbonáceas, producto de la absorción quiroselectiva de los L-enantiómeros por parte de una superficie asimétrica de nanotubos R de carbono, permite excluir el problema de la existencia de una fuente de LPC-UV en el espacio interestelar, del mismo modo que evita el problema del dicroísmo circular sobre mezclas racémicas de diferentes tipos de aminoácidos.
- 5.- Proponer la existencia de un sustrato asimétrico compuesto por nanotubos quirales de carbono, sobre la superficie de meteoritos condritas carbonáceas, permite dirigir la búsqueda de la fuente de asimetría para generar el exceso L-enantiomérico en los aminoácidos meteoríticos de manera concreta a este tipo de macromoléculas orgánicas; y permite así mismo definir protocolos realizables para probar la propuesta de la absorción quiroselectiva.
- 6.- El origen de la asimetría quiral en aminoácidos meteoríticos representa un fenómeno de convergencia entre procesos independientes y diversos en el Universo, que se verifica sobre la superficie de condritas carbonáceas: la formación de nanotubos quirales de carbono es un proceso que se da en las regiones circunestelares, bajo la influencia de fuertes campos magnéticos y de LPC y radiación sincrotrónica, que pueden generar excesos enantioméricos a favor de su configuración R. La formación aquiral de aminoácidos representa la existencia de vías abióticas para su síntesis en el medio interestelar, como la ruta de Strecker. Ambos procesos convergen sobre las superficies meteoríticas dando paso al exceso L-enantiomérico en los α -metil aminoácidos.
- 7.- La vida tiene una base material que la origina, en primer instancia, gracias a la capacidad de optimizar la información contenida en sí misma, tanto del ambiente que la rodea como de su propia dinámica y estructura interna. Esta propiedad de optimizar la información se encuentra sustentada gracias a la condición homoquiral de un sistema biogénico.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Aldana M.**, Cázarez-Bush F., Cocho G. y Martínez-Mekler G. 1998. Primordial synthesis machines and the origin of the genetic code. *Physica A* 257: 119-127.
- Aldana-González M.**, Cocho G., Larralde H. y Martínez-Mekler G. 2003. Polymer transport in random potentials and the genetic code: the waltz of life. *Ann. Henri Poincaré* 4, suppl. 1: S459-S474.
- Bailey J.** 2001. Circularly polarized light and the origin of homochirality. *Orig. of Life and Evol. Biosph.* 31: 167-183.
- Balavoine G.**, Moradpour A. y Kagan H. 1974. Preparation of chiral compounds with high optical purity by irradiation with circularly polarized light, a model reaction for the prebiotic generation of optical activity. *Jour. Am. Chem. Soc.* 96 (16): 5152-5158.
- Basiuk V. A.**, Albarran G., Basiuk E. V. y Saniger J. M. 2005. *Stability of interstellar fullerenes under high-dose c-irradiation: new data* . *Advanc. Space Res.* 36: 173-177
- Becker L.**, Poreda R. J. y Bunch T. E. 2000. Fullerenes: an extraterrestrial carbon carrier phase for noble gases. *PNAS.* 97 (7): 2979-2983.
- Bonner W. A.** 1991. The origin and amplification of biomolecular Chirality. *Orig. of Life and Evol. Biosph.* 21: 59-111.
- Bonner W. A.** y Bean B. D. 2000. Asymmetric photolysis with elliptically polarized light. *Orig. of Life and Evol. Biosph.* 30: 513-517.
- Bonner W. A.** y Flores J. J. 1975. Experiments on the origin of optical activity. *Orig. of life.* 6: 187-194.
- Bonner W. A.** y Rubenstein E. 1987. Supernovae, neutron stars and biomolecular chirality. *Biosystems.* 20: 99-111.
- Carraro C.**, Maboudian R. y Stoldt C. R. 2010. Infrared and ultraviolet spectra of fullerenes: HREELS studies and implications for the interstellar medium . Springer. *En: Fullerenes: the hydrogenated fullerenes.* Cataldo e Iglesias-Groth (eds.). ISBN 978-1-4020-9886-4.
- Carroll J.** 2009. A new definition of life. *Chirality* 21: 354-358.
- Cataldo F.** y Pontier-Johnson M. A. 2002. Recent discoveries in carbon black formation and morphology and their implications on the structure of interstellar carbon dust. *Full., Nanotub. and Carb. Nanostruct.* 10 (1): 1-14.
- Cerf C.** y Jorissen A. 2000. Is amino-acids homochirality due to asymmetric photolysis in space?. *Space Science Reviews.* 92: 603-612.
- Chang R.** 2005. Chemistry. Ed. Mc Graw Hill, EUA. Pp. 917-924.
- Charney E.** 1979. The molecular basis of optical activity. J. Wiley. EUA. P. 234.
- Chela-Flores J.** 1994. The origin of chirality in protein amino acids. *Reporte interno del ICTP:* 1-13.
- Cornish-Bowden A.** y Cárdenas M. L. 2008. Self-organization at the origin of life. *Jour. Theor. Biol.* 252: 411-418.
- Cronin J. R.** y Pizzarello S. 1997. Enantiomeric excesses in meteoritic amino acids. *Science.* 275: 951-955.
- Cronin J. R.**, y Moore C. B. 1976. Amino acids of the Nogoya and Mokoia carbonaceous chondrites. *Geochemistry and Cosmochemistry Acta.* 40: 853-857.
- Cronin J.** y Reisse J. 2005. Chirality and the origin of the homochirality. *Lectures in Astrobiology* vol. I, pp. 473-515.

- Darányi M.**, Csesznok T., Kukovecz A., Kónya Z., Kiricsi I., Ajayan P. M. y Vajtai R. 2011. *Layer-by-layer assembly of TiO₂ nanowire/carbon nanotube films and characterization of their photocatalytic activity*. *Nanotechnology* 22: 195701 (9pp).
- Ehrenfreund P.** y Cami J. 2010. Cosmic carbon chemistry: from the interstellar medium to the early earth. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*. 2: a 002097.
- Ehrenfreund P.** y Charnley S. 2000. Organic molecules in the interstellar medium, comets, and meteorites: a voyage from dark clouds to the de early earth. *Annu. Rev. Astron.. Astrophys.* 38: 427-483.
- Engel M. H.** y Macko S. A. 1997. Isotopic evidence for extraterrestrial non-racemic amino acids in the Murchison meteorite. *Nature*. 389: 265-268.
- Epstein S.**, Krishnamurthy R. V., Cronin J. R., Pizzarello S. y Yuen G. U. 1987. Unusual stable isotope ratios in amino acids and carboxylic extracts from the Murchison meteorite. *Nature*. 326: 477-479.
- Fasel R.**, Cossy A. y Ernst K. H. 2001. Orientation of chiral heptahelicene C₃₀H₁₈ on copper surfaces: an x-ray photoelectron diffraction study. *Journal of Chemical Physics*. 115 (2): 1020-1027.
- Flores J.**, Bonner W. Y Massey G. 1977. Asymmetric photolysis of (R, S)-leucine with circularly polarized light. *Jour. Am. Chem. Soc.* 99: 3622-3625.
- Fujii N.** 2002. D-amino acids in living higher organisms. *Orig. of Life and Evol. Biosph.* 32: 103-127.
- Garvie L. A. J.** y Buseck P. R. 2004. Nanosized carbon-rich grains in carbonaceous chondrite meteorites. *Earth and Planetary Science Letters* 224: 431 – 439.
- Glavin D. P.** y Dworkin J. P. 2009. Enrichment of the amino acid L-isovaline by aqueous alteration on CI and CM meteorite parent bodies. *PNAS*. 106 (14): 5487-5492.
- Gleiser M.** y Walker S. I. 2008. An extended model for the evolution of prebiotic homochirality: a bottom-up approach to the origin of life. *Orig. of Life and Evol. Biosph.* 38: 293-315.
- Harada K.** 1963. *Asymmetric Synthesis of α -Amino-acids by the Strecker Synthesis*. *Nature* 21 de diciembre, 200: 1201.
- Hazen R. M.**, Filley R. F. y Goodfriend G. A. 2001. Selective adsorption of L- and D-amino acids on calcite: implications for biochemical homochirality. *Proc. Nat. Academic Sciences*. 98: 5487-5490.
- Hazen R. M.**, y Sholl D. S. 2003. Chiral selection on inorganic crystalline surfaces. *Nature*. 2: 367-374.
- Henning Th.** Y Salama F. 1998. Carbon in the Universe. *Science*. 282 (5397): 2204-2210.
- Herrera A. L.** 1924. Biología y plasmogenia. Herrera hermanos sucesores. México D. F., México. Pp. 35-68.
- Herrera A. L.** 1932. La plasmogenia, nueva ciencia del origen de la vida. Cuadernos de cultura LXIX. Valencia, España.
- Jorissen A.** y Cerf C. 2002. Asymetric photoreactions as the origin of biomolecular homochirality: a critical review. *Orig. Life and Evol. Biosph.* 32 (2): 129-142.
- Kawasaki T.**, Hatase K., Fujii Y., Jo K., Soai K. y Pizzarello S. 2006. The distribution of chiral asymmetry in meteorites: an investigation using asymmetric autocatalytic chiral sensors. *Geochim. et Cosmochim. Acta* 70: 5395-5402.
- Kliger D. S.**, Lewis J. W. y Randall C. E. 1990. *Polarized light and spectroscopy*. Boston Academic Publisher.

- Kompanichenko V.** 2008. Three stages of the origin-of-life process: bifurcation, stabilization and inversion. *Intern. Jour. Astrobiol.* 7 (1): 27-46.
- Kompanichenko V.** 2009. Changeable hydrothermal media as a potential cradle of life on a planet. *Planetary and Space Science.* 57: 468-476.
- Martínez-Mekler G.,** Aldana M., Cázarez-Bush F., García-Pelayo R., y Cocho G. 1999. Primitive molecular machine scenario for the origin of the three base codon composition. *Orig. of life and Evol. Biosph.* 29: 203-214.
- Marx K.** 1872. El capital. Tomo I, vol. I. (1981) *Siglo XXI Editores.* México. Pp. 59, 64, 71, 74-76.
- Mason S. F.** 1997. Extraterrestrial handedness. *Nature* 389, p. 804.
- Maury C. P. J.** 2009. Self-propagating β -sheet polypeptide structures as prebiotic informational molecular entities: the amyloid word. *Orig. of life and Evol. Biosph.* 39: 141-150.
- Miramontes P.,** Medrano L., Cerpa C., Cedergren R., Ferbeyre G. y Cocho G. 1995. Structural and thermodynamic properties of DNA uncover different evolutionary histories. *Jour. Mol. Evol.* 40: 698-704.
- Moshinsky M.** 2008. Quiralidad en la física y en la matemática. En: Quiralidad en la química, la física y la biología, Juarista E. y Novarro O. (coordinadores). Pp 43-55. Editado por El Colegio Nacional.
- Nordén B.** 1977. Was photoresolution of amino acids the origin of optical activity in life. *Nature.* 266: 567-568.
- Ogayar A. y** Sánchez.Pérez M. 1998. Prions: an evolutionary perspective. *Internat. Microbiol.* 1: 183-190.
- Orgel L.** 1998. The origin of life, a review of facts and speculations. *Elsevier Science* 491-495.
- Osman M. A.,** Cummings A. W. y Srivastava D. 2007. Thermal properties of carbon nanotubes. *En: Molecular building blocks for nanotechnology.* Mansoori G. A., George T. F., Assoufid L. y Zhang G. (eds.). Springer, E. U. A. ISBN-10: 0-387-39937-2. Pp. 154-187.
- Patiño M. A.** 2005. Dicroísmo circular. Comunicado Universidad de Barcelona.
- Penza M.,** Alvisi M., Rossi R., Serra E., Paolesse R., D'Amico A. y Di Natale C. 2011. Carbon nanotube films as a platform to transduce molecular recognition events in metalloporphyrins. *Nanotechnology* 22125502 (8pp).
- Pizzarello S.** 2007. The chemistry that preceded life's origin: a study guide from meteorites. *Chemistry and Biodiversity.* 4: 680-693.
- Pizzarello S. y** Cronin J. R. 2000. Non racemic amino acids in the Murchison and Murray meteorites. *Geochemistry and Cosmochemistry Acta.* 64: 329-338.
- Pizzarello S. y** Huang Y. 2005. The deuterium enrichment of individual amino acids in carbonaceous meteorites: a case for the presolar distribution of biomolecules precursors. *Geochem. and Cosmochem. Acta.* 64: 329-338.
- Pizzarello S. y** Weber A. L. 2010. Stereoselective syntheses of pentose sugars under realistic prebiotic conditions. *Orig. of Life and Evol. Biosph.* 40:3-10.
- Pizzarello S.,** Huang Y. y Alexandre M. R. 2008. Molecular asymmetry in extraterrestrial chemistry: insights from a pristine meteorite. *PNAS.* 105 (10): 3700-3704.
- Pizzarello S.,** Zolensky M. y Turk K. A. 2003. Nonracemic isovaline in the Murchison meteorite: chiral distribution and mineral association. *Geochem. and Cosmochem. Acta.* 67: 1589-1595.

- Ricardo** A. y Szostak L. 2009. Life on earth. *Scientific American*. Septiembre: 54-63.
- Saladino** R., Crestini C., Cossetti C., Di Mauro E. y Deamer D. 2011. Catalytic effects of Murchison material: prebiotic synthesis and degradation of RNA precursors. *Orig. of Life and Evol. Biosph.* DOI 10.1007/s11084-011-9239-0.
- Shapiro** R. 2007. A simpler origin for life. *Scientific American*. Febrero.
- Sigman** M. S., Vachal P. y Jacobsen E. N. 2000. *A general catalyst for the asymmetric Strecker reaction*. *Angew Chem. Int. Ed.* 39 (7): 1279-1281.
- Tománek** D., Jorio A., Dresselhaus M. S. y Dresselhaus G. 2008. Introduction to the important and exciting aspects of carbon-nanotube science and technology. *En: Carbon nanotubes*. Jorio A., Dresselhaus G. y Dresselhaus M. S. (eds.). Springer, E. U. A. ISBN: 978-3-540-72865-8. Pp. 1-12.
- Vandenbussche** S., Reisse J., Bartik K. y Lievin J. 2011. The search for a deterministic origin for the presence of nonracemic amino-acids in meteorites: a computational approach. *Chirality*. 23: 367-373.
- Varela** F. G., Maturana H. R. y Uribe R. 1974. Autopoiesis: the organization of living systems, its characterization and model. *Biosystems*. 5 (4): 187-196.
- Weber A. L. 1998. Prebiotic amino acid thioester synthesis: thiol-dependent amino acid synthesis from formose substrates (formaldehyde and glycolaldehyde) and ammoni. *Orig. of Life and Evol. Biosph.* 28: 259–270.

IX. ANEXOS

Anexo 1: Autoorganización y Propiedades Emergentes

En el cuerpo de la presente tesis se ha enfatizado ya en la propiedad de los sistemas autoorganizados de poder establecer interacciones entre sus elementos constituyentes, dando origen a patrones de organización interna, además de que gracias a estas interacciones, ciertas propiedades contenidas en los elementos del sistema se vuelven dinámicas al ser por medio de las cuales éstos establecen sus relaciones, y se ha señalado la diferencia de estas propiedades que se “activan”, y la emergencia de propiedades novedosas que son producto exclusivamente de la interacción entre los elementos.

Para aclarar este punto, tomaremos un ejemplo no vinculado con esta tesis: el valor presente en una mercancía cualquiera, el cuál de ningún modo se trata de la manifestación divina o milagrosa de alguna deidad (como el mercado mundial), sino una propiedad contenida y adquirida en la misma mercancía durante el proceso que le da origen, al entrar dicho objeto producto del trabajo humano a una relación de intercambio con otras mercancías, puede originar y sustentar el mercado mundial (o en términos generales, cualquier mercado: ya sea regional, local, etc.). En otras palabras, se tiene que de la propiedad contenida en las mercancías de ser portadoras de valor, sólo cuando entran éstas en una relación de intercambio dentro del mercado es como este valor se hace efectivo y se manifiesta como un algo contenido en la mercancía, lo que permite la emergencia de una dinámica intensiva de intercambio de mercancías que soporta el mercado mundial. De esta relación entre mercancías, la efectivización o concreción de su valor no es otra cosa que la expresión de una magnitud de valor, que es producto de una cantidad medible de trabajo humano para su elaboración. El valor (o el precio, considerado éste como un modo de expresar el valor), de un kilogramo de maíz no puede ser conocido si se mira al maíz como un ente aislado y sin relación alguna con otras mercancías. Sólo cuando el kilogramo de maíz es colocado dentro de una relación de intercambio en el mercado es como su valor (o su precio) puede ser expresado gracias a que se nos hace visible al compararlo con otras mercancías distintas al maíz, pero que comparten la propiedad de ser productos del trabajo humano y, por tal, manifestaciones concretas de dicho trabajo humano y portadoras de valor. Esta relación, pues, no deja claro que sólo dentro de ella es que el valor de una mercancía puede ser conocido, es decir, sólo dentro de la relación de intercambio, la información del valor de un objeto tratado como mercancía se hace efectiva.

Hasta aquí con este ejemplo, nada de mágico o inexplicable puede ser encontrado en esto, y nadie concluiría que el valor de una mercancía, siendo éste la expresión social del trabajo humano que la genera, existe independientemente de ella, a la espera de manifestarse súbitamente, al más puro estilo del Espíritu Santo, en un objeto cualquiera al cuál le otorga milagrosamente la cualidad de ser mercancía. Esto ocurre precisamente en sentido opuesto: el proceso de creación de una mercancía es el mismo proceso por el cuál obtiene un valor (en el mercado), éste proceso es el trabajo humano que la genera; sin embargo, este valor sólo se nos muestra si la mercancía como objeto producto de dicho trabajo, se inserta dentro de un tipo específico de relación: el intercambio con otras mercancías (en sentido más preciso, el intercambio con otros productos del trabajo humano). Sólo dentro de la relación entre mercancías, la información sobre su valor puede ser conocido, y es más, la propiedad

de ser el valor de una mercancía una expresión de la cantidad de trabajo humano contenido en ella, sólo puede ser entendida dentro de la relación de intercambio entre mercancías.

Si dicha mercancía, por ejemplo el kilogramo de maíz, no se inserta dentro de una dinámica de intercambio con otras mercancías, su valor no puede ser expresado y por lo tanto tampoco da información sobre la cantidad relativa de trabajo humano necesario para elaborarla. Este objeto, fuera de la relación de intercambio, se mantiene tan sólo como un kilogramo de maíz, que satisface necesidades específicas, pero que no es de modo alguno mercancía y su valor no se hace cognoscible, pero tampoco desaparece al ser éste producto del trabajo humano que le produjo. El valor del kilogramo de maíz, por lo tanto, permanece oculto. Es hasta que el maíz deja de ser para consumo personal y comienza a ser intercambiado por otros productos del trabajo humano, cuando su valor puede ser expresado sólo dentro de la dinámica de intercambio. El valor así entendido es un tipo de información que se hace visible solamente cuando las mercancías son tratadas como tales, es decir, sólo cuando se encuentran inmersas y estableciendo una interrelación mutua por medio de una relación de intercambio. Este tipo de relación entre estos objetos, además de dar información de ellos, da información de la dinámica global de intercambio al cual sustentan las mercancías, en otras palabras, este tipo de interacción entre los elementos del sistema, aporta información sobre el sistema mismo, al cuál además sustentan (el mercado mundial), y que es la de ser un tipo específico de producir e intercambiar los productos del trabajo entre productores (privados en el caso de la sociedad actual, y que soporta una dinámica capitalista). En este mismo sentido, el mercado mundial es una propiedad emergente de un sistema (económico y social), cuya base material y que le da soporte real, son las mercancías, las cuáles al ser intercambiadas (al establecer interacciones por medio de los productores), dan información sobre los modos de producirlas e intercambiarlas, además de mostrar que poseen propiedades como la de ser productos del trabajo humano.

Con este ejemplo se puede evidenciar que, en primer lugar, la relación dinámica entre elementos de un sistema de este tipo permite obtener información sobre el sistema mismo, que no puede ser obtenida si dicha interacción no se establece, pero que se encuentra presente en los elementos del sistema, aunque oculta a cualquier análisis. En segundo lugar, se hace evidente que gracias a esta interacción mutua entre los elementos del sistema, las propiedades que son comunes en ellos se efectivizan al tomar parte activa en la interacción (como el de ser producto del trabajo humano una mercancía, para poder expresarlo como valor de ésta), permitiendo de este modo que las interacciones iniciales entre estos componentes comiencen a organizarse por su misma dinámica al interior del sistema y por las propiedades contenidas en ellos; lo que resulta en un fenómeno de autoorganización (el intercambio inicial entre productos del trabajo efectuado por productores independientes, al inicio representaba un fenómeno poco frecuente, hasta que las condiciones materiales e históricas humanas permitieron que esta dinámica fuera cada vez más frecuente, sin que nadie estipulara reglas de antemano o un modo en que dicho intercambio debía ser desarrollado: el intercambio, ya con su dinámica interna, imprimió necesidades a las sociedades existentes, que fueron y son resueltas una vez que ya son un hecho fijo en la sociedad). En tercer lugar, parece claro que la dinámica interna de un sistema está determinada por la naturaleza material de sus elementos constitutivos, por lo que el establecimiento de una dinámica dentro de algún sistema que puede autoorganizarse, está dado inicial y fundamentalmente por las propiedades de sus componentes y su habilidad

para establecer relaciones mutuas entre ellos; sin embargo no debe entenderse que su capacidad para establecer interacciones sólo conducen a un mismo y único tipo de interacción, sino a una diversidad de posibles interacciones condicionadas por la diversidad de propiedades contenidas en los elementos del sistema, pero que sólo es una la que se hace manifiesta (una mercancía tiene además de un valor en el mercado, un valor de uso, además de ser un producto del trabajo humano; si la relación entre mercancías se basa en la propiedad de tener un valor monetario, la dinámica es una, si se basa en la propiedad de ser un valor de uso, la dinámica, cualitativamente, será otra distinta, o si se basa en la propiedad de ser producto del trabajo, donde la dinámica estará basada en la relación equivalente entre trabajos humanos): *“la evolución no sólo representa un avance, sino que, al mismo tiempo, representa un retroceso, pues niega la posibilidad de desarrollo por otras vías”* (Marx, 1857).

Y por último, se evidencia que sólo a partir de dicha dinámica interna en un sistema autoorganizado es que éste puede adquirir propiedades novedosas, no existentes previamente en alguno de sus componentes, sino soportadas por el dinamismo existente en la interacción interna (como el mercado mundial, que sólo existe gracias al modo en que funciona el sistema económico actual), y que, por lo que se ha mencionado ya, no son propiedades únicas, sino una de las varias posibilidades que el sistema puede soportar gracias al tipo de interacción entre sus elementos, y que se hace real y concreta al hacerse también real y concreto cierto tipo de interacción, por lo que estas manifestaciones cualitativas del sistema son conocidas como propiedades emergentes del sistema (el sistema capitalista actual se basa en una tipo particular de relación entre los individuos como productores de valores de cambio [como las mercancías], el cuál requiere ciertas leyes jurídicas y éticas, lo cuál se trata de una propiedad emergente; si los medios de producción, por ejemplo, pasaran de ser propiedad privada a ser propiedad colectiva de la sociedad [y fuera asumido colectivamente su mantenimiento, modernización, planeamiento, etc.], las relaciones entre productores cambiarían, del mismo modo que el intercambio de sus productos al ya no estar regulado éste por la ley de la oferta y la demanda, sino por las necesidades colectivas de la sociedad; lo cuál haría obsoletas algunas leyes y haría necesarias otras, generando un sistema político-económico cualitativamente distinto), y resulta ilógico pensar que dichas propiedades emergentes existen de manera independiente al sistema, del mismo modo que resulta ilógico suponer que su manifestación en un sistema es un fenómeno inexplicable.

Así, la propiedad de almacenar información por parte de las moléculas quirales, es tomada como una propiedad fundamental en este trabajo, la cuál al hacerse efectiva dentro de polímeros homoquirales, es capaz de permitir a éstos una óptima transferencia de información, pudiendo definir una dinámica fuera del equilibrio que, dentro de un sistema prebiótico, muy posiblemente es capaz de soportar una dinámica biológica incipiente, dando paso a un sistema biogénico y, con éste, al inicio de los sistemas vivos.

Anexo 2: Sistemas Complejos

La propiedad característica de un sistema complejo es la relación dinámica entre sus partes constituyentes, que establecen un conjunto complicado de múltiples relaciones. Marx ya identificaba que las propiedades que dan identidad a un sistema sólo pueden ser entendidas cuando se identifican sus principales componentes y se analizan en sus interacciones dentro del sistema: *“Parece correcto empezar por lo real y concreto, con el presupuesto efectivo; y en consecuencia, empezar, por ejemplo, en la economía con la población, que es el fundamento y sujeto de todo acto de producción social. Sin embargo, ante un examen más detenido, esto se manifiesta como falso. La población es una abstracción, si dejas, por ejemplo, de lado las clases de las que se compone. Estas clases son una palabra vacía, si no conozco los elementos sobre las que descansan. Por ejemplo, trabajo asalariado, capital, etc. [...] Si comenzara, por lo tanto, con la población, esto sería una representación caótica de la totalidad y mediante una determinación más precisa llegaría analíticamente a conceptos cada vez más simples; de lo concreto representado llegaría a abstracciones cada vez más sutiles, hasta alcanzar las determinaciones más simples. A partir de aquí habría que emprender de nuevo el viaje a la inversa, hasta llegar finalmente de nuevo a la población, pero esta vez no como una representación caótica de un todo, sino como una totalidad rica de múltiples determinaciones y relaciones”*. Karl Marx (1857). Líneas fundamentales de la crítica de la economía política (grundrisse).

De este modo, resulta evidente que el cambio en un sistema puede realizarse sin necesidad de modificar, eliminar o integrar a éste algún elemento, sino que puede efectuarse mediante la modificación de las relaciones que se establecen entre sus partes constituyentes. Estas propiedades que definen a un sistema complejo son, así, la manifestación colectiva de su dinámica interna como procesos de autoorganización, y se basan en el tipo de relación que se establece entre los elementos, de entre las varias posibles interacciones que los mismos elementos pueden definir. Por tal motivo las propiedades soportadas y manifestadas por estos sistemas son la realización concreta de una vía de autoorganización, que al encontrarse bajo influencia de las condiciones externas a él, puede verse favorecido o no.

Este favorecimiento de una vía sobre otra, producto de la autoorganización, se da de manera abrupta, como lo ha postulado el materialismo dialéctico permitiendo considerar el cambio (o evolución) de los sistemas por medio de cambios cualitativos, que se dan de manera no gradual al modificar las relaciones que son mantenidas por los elementos al interior del sistema. Aquí podemos ya apreciar la otra característica fundamental de los sistemas complejos: la no linealidad; donde la modificación del tipo de relaciones a lo interno del sistema dan como resultado un cambio en su configuración intrínseca y, de este modo, un cambio abrupto en sus propiedades colectivas que le dan identidad.

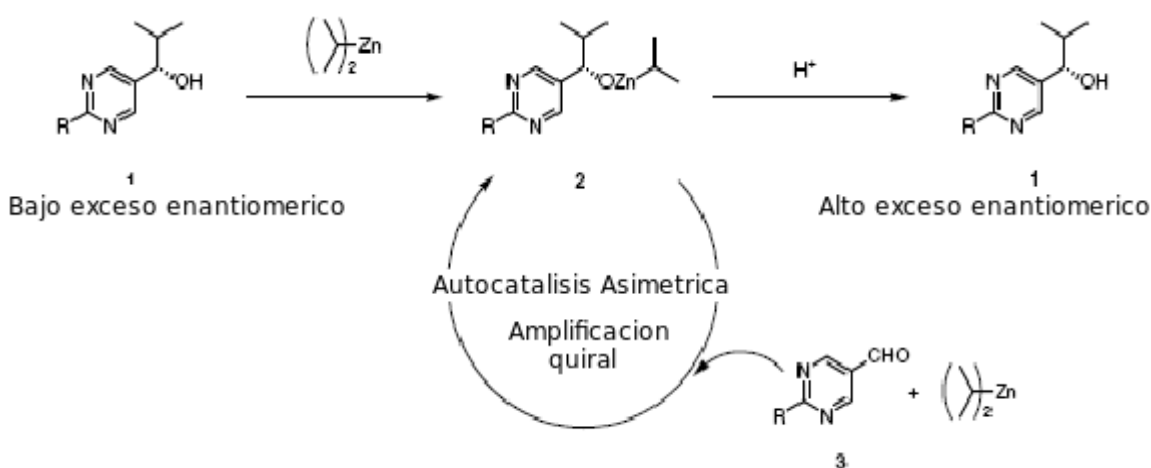
Por lo anterior, en el contexto de la presente tesis se hace referencia a este abrupto cambio en las propiedades simétricas de un sistema como ruptura espontánea de la simetría, y encontrar los factores o la fuerza que permite esta ruptura espontánea de la simetría en mezclas racémicas ha dado varias ideas, como la nucleación heterogénea y enantioselectiva de moléculas quirales sobre la superficie de sustratos con quiralidad opuesta (como el cuarzo, kaolita o arcillas, que aunque sus moléculas no son quirales, pueden generar estructuras quirales al agregarse). Muchas de estas ideas para explicar la RES no definen

procesos únicos para moléculas de una quiralidad dada, sino procesos donde existe la misma probabilidad de generar ambientes homoquirales de uno u otro enantiómero que, en el contexto del ambiente en general, origina mezclas racémicas; como se trata con detalle en el cuerpo de este trabajo.

Anexo 3: Reacción de Soai

Una vez que se ha logrado un desequilibrio significativo en una mezcla racémica, favoreciendo la preeminencia de uno de los enantiómeros sobre el de quiralidad opuesta, este ligero desequilibrio inicial puede ser amplificado a valores muy altos de pureza óptica gracias a reacciones químicas que sean sensibles a sustratos de una quiralidad específica, dando como producto de la reacción una molécula con la misma quiralidad que la empleada para el inicio de ésta. A esta reacción, o serie de ellas, que emplean una molécula quiral como catalizador de la reacción para originar productos moleculares con la misma quiralidad se le denomina de autocatálisis, y dado que sólo genera moléculas de la misma quiralidad que la molécula empleada al inicio, se le llama enantioselectiva, y puede generar valores altos del exceso enantiomérico a partir de valores bajos.

La reacción de autocatálisis que mejor se ha descrito para amplificar el exceso enantiomérico inicial en moléculas orgánicas es la llamada reacción de Soai, descrita en 1995, y empleada en los experimentos para determinar la quiralidad del material orgánico insoluble de los meteoritos Murchison, Murray y Allende (Kawasaki *et al.*, 2006). En la reacción se parte de un pirimidil alcohol quiral, con un bajo exceso enantiomérico; el cual genera un zinc alcoxido intermediario con la misma quiralidad. Este zinc alcoxido cataliza la adición de zinc diisopropil a un aldehído quiral, transfiriéndole la misma quiralidad para generar más zinc alcoxido quiral, el cual, tras sufrir hidrólisis, da como producto final de la reacción pirimidil alcohol con la misma quiralidad que la original, generando un exceso enantiomérico alto.



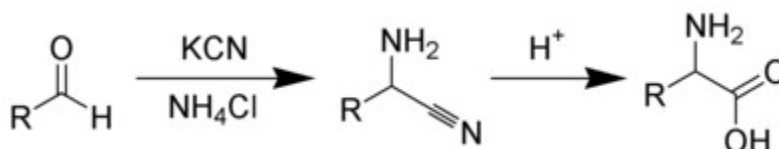
Esquema de la Reacción de Soai. Se muestra la amplificación de un exceso enantiomérico inicialmente bajo, a valores altos por medio de una reacción de autocatálisis asimétrica, donde un intermediario de la reacción es capaz de catalizar y transferir su quiralidad a una molécula. 1, alcohol pirimidil; 2, zinc alcoxido quiral; 3, aldehído quiral. *Modificado de Kawasaki et al., 2006.*

De este modo, cuando en el medio existe una mezcla de enantiómeros racémica, o que presenta ligeras variaciones no muy drásticas (no significativas) de uno de ellos; la reacción de autocatálisis emplea sin alguna preferencia ambos enantiómeros, manteniéndose igualmente una mezcla racémica. Por el contrario, cuando en el medio existe un bajo pero significativo exceso enantiomérico, capaz de disparar la catálisis asimétrica, el exceso

inicial podrá ser amplificado a valores altos de éste al generarse el intermediario autocatalítico de la misma quiralidad que la molécula inicial de la reacción. De este modo, la reacción de Soai representa un modelo experimental que describe una reacción química capaz de originar un sistema con una pureza óptica muy elevada, partiendo de un inicial exceso enantiomérico bajo.

Anexo 4: Síntesis de Strecker

La síntesis de aminoácidos descrita por Adolph Strecker en 1850 en un artículo titulado "Ueber die künstliche Bildung der Milchsäure und einen neuen, dem Glycocoll homologen Körper", publicado en los *Annalen der Chemie und Pharmazie* 75 (1): 27–45, se trata de una serie de reacciones químicas que parten de un ambiente aquiral constituido por un aldehído o una cetona, que condensan con cloruro de amonio en presencia de cianuro de potasio o de azufre para formar aminoácidos quirales (α -aminoácidos) en proporciones racémicas, después de la hidrólisis de la amina que se forma (α -amino nitrito). En el trabajo realizado por Strecker, se pusieron a reaccionar acetaldehído y amonio que, en presencia del cianido de hidrógeno y posterior al evento de hidrólisis, dieron paso a la síntesis de alanina (Sigman *et al.*, 2000).



Esquema de la Síntesis de Strecker. A partir de un aldehído, el cloruro de amonio (NH_4Cl) reacciona por medio de un ataque nucleofílico en presencia del cianuro de potasio (KCN) para formar una imina quiral. La segunda reacción consiste en la hidrólisis de la α -imina para formar el aminoácido.

Actualmente se han desarrollado procedimientos que emplean auxiliares asimétricos o catalizadores asimétricos para generar aminoácidos con excesos enantioméricos (Harada, 1963). Como puede apreciarse, esta ruta de síntesis abiótica puede considerarse altamente probable en el ambiente interestelar, sobre superficies de meteoritos que contengan agua para la hidrólisis, además de poder observarse que se parte de un ambiente aquiral, sin alguna preferencia enantiomérica pero que puede romperse esta simetría en presencia de auxiliares quirales, como lo hemos estado proponiendo en esta tesis.

