

01123  
7



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

GENERACION DE HIDROCARBUROS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO GEOLOGO

P R E S E N T A :

**MIREYA OSORIO ROSALES**

DIRECTOR DE TESIS: ING. JAVIER ARELLANO GIL



CIUDAD UNIVERSITARIA,

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

2003

A



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## AGRADECIMIENTOS

*A mis abuelitos Lolita y José:*

*Por todo su amor, por los valores que me han inculcado  
y por ser la base de la orgullosa familia que ahora tengo.*

*A mis Padres: Mireya y Miguel:*

*Porque me han dado la mejor herencia, el estudio y preparación,  
por todo su esfuerzo, apoyo y dedicación, para que día a día sea una mejor persona,  
con amor y comprensión y por ser mi mejor ejemplo para seguir adelante.*

*A mi hermana Berenice:*

*Porque siempre hemos estado juntas, por ser mi amiga, compañera  
y la mejor hermana del mundo.*

*A Raúl:*

*Por haber compartido el mismo camino juntos, sin dejar de creer en mí,  
Apoyándome en todo momento, por toda la confianza, motivación  
y el amor incondicional que siempre he recibido, y que ni con todo los tesoros  
del mundo podría pagar.*

UNAM a través de la Dirección General de Bibliotecas de la  
UNAM a donado en formato electrónico e impreso el  
contenido de mi trabajo recepcional.

INFORMANTE: Osorio Rosales

Mireya

FECHA: 03-09-2003

TELÉFONO: 011

*A mis Tíos y Tías: José, Malena, Roberto, Ma. De los Angeles, y Ana:  
Por todo el amor y cariño, por su apoyo incondicional  
y porque siempre han formado parte de los momentos importantes de mi vida.*

*A mis Primos y Primas:  
Porque hemos crecido juntos y de cada uno he aprendido algo valioso.*

*A Luis:  
Por su apoyo y amistad invaluable.*

*A mi asesor Ing. Javier Arellano Gil:  
Por su Tiempo y Dedicación, por sus consejos y por su valiosa ayuda, sin la que no  
hubiera sido posible la realización de este trabajo.*

*A mis amigos y amigas: Selene, Citlali, Claudia, Zaira, Maribel, Mayumy, Edgar, Gerardo  
y Alberto: Por su valiosa y duradera amistad.*

## GENERACIÓN DE HIDROCARBUROS

### INDICE

RESUMEN .....	1
INTRODUCCIÓN.....	3
OBJETIVOS .....	4
CAPÍTULO I IMPORTANCIA DE LOS HIDROCARBUROS.....	6
1.1 Recursos naturales renovables.....	7
1.2 Recursos naturales no renovables .....	8
1.3 Características de los componentes de los hidrocarburos .....	10
1.4 Historia del Petróleo en México .....	13
CAPÍTULO II TEORIAS SOBRE EL ORIGEN DEL PETRÓLEO.....	22
2.1 Teorías inorgánicas .....	22
2.2 Teoría orgánica .....	26
2.3 Discusión.....	27
CAPÍTULO III EI CICLO DEL CARBONO.....	33
3.1 Fuentes de Carbono .....	35
3.1.1 Plantas.....	35
3.1.2 Foraminíferos.....	37
3.1.3 Materia orgánica disuelta .....	38
3.1.4 Fósiles Geoquímicos .....	38
3.1.5 Animales .....	38
3.1.6 Combustión.....	38
3.1.7 Descomposición.....	39
3.1.8 Corrientes oceánicas frías .....	39
3.1.9 Volcanes.....	40
3.1.10 Equilibrio.....	40
3.1.11 Intercambio Tierra - Mar.....	40
3.1.12 Intercambio aguas superficiales - profundas .....	41
3.1.13 Intercambio océano - atmósfera.....	41
3.1.14 Ciclos reversibles .....	42
CAPÍTULO IV CARACTERÍSTICAS DE LA MATERIA ORGÁNICA Y ROCAS GENERADORAS.....	46
4.1 Definición de materia orgánica.....	46
4.2 Origen y fuente de la materia orgánica: La fotosíntesis.....	47
4.2.1 La naturaleza de la luz.....	48
4.3 Evolución de la materia orgánica .....	53

## GENERACIÓN DE HIDROCARBUROS

4.3.1 Etapas de la fotosíntesis .....	56
4.3.2 Reacciones independientes de la luz .....	59
4.3.3 Protección de las plantas contra el sol .....	60
4.3.4 Evolución de la Biósfera .....	61
4.3.5 Evolución de los organismos .....	62
4.3.6 Productores primarios de la materia orgánica .....	65
4.3.7 Biomasa .....	69
4.4 Componentes químicos de la biomasa .....	70
4.4.1 Carbohidratos .....	71
4.4.2 Proteínas .....	83
4.4.3 Lípidos .....	88
4.4.4 Lignina .....	93
4.4.5 Porfirina .....	95
4.5 Características de las rocas generadoras .....	97
4.6 Factores que influyen en la formación de las rocas generadoras .....	100
4.7 Clasificación de las rocas generadoras .....	101
4.7.1 Series arcillo - arenosas .....	104
4.7.2 Series carbonatadas .....	113
4.7.3 Rocas sedimentarias organógenas .....	115
4.8 Características biológicas de las rocas generadoras .....	119
4.8.1 Rocas generadoras y tipo de materia orgánica .....	120
4.8.2 Cantidad de materia orgánica en las rocas generadoras .....	120
4.8.2 Calidad de materia orgánica en las rocas generadoras .....	121

## CAPÍTULO V DIAGÉNESIS, CATAGÉNESIS Y METAGÉNESIS .....

5.1 Diagénesis .....	130
5.1.2 El Kerógeno .....	131
5.1.3 Tipos de Kerógeno .....	134
5.1.4 Química del Kerógeno .....	135
5.1.5 Reflectancia de la Vitrinita .....	137
5.2 Catagénesis .....	141
5.3 Metagénesis y Metamorfismo .....	145

## CAPÍTULO VI CLASIFICACIÓN DE LOS ACEITES CRUDOS, EL GAS NATURAL Y LOS HIDRATOS DE METANO .....

6.1 Clasificación de los Hidrocarburos .....	153
6.1.2 Hidrocarburos Saturados .....	154
6.1.3 Alcanos .....	155
6.1.4 Naftenos. Cicloalcanos (Alicíclicos) .....	167
6.2 Hidrocarburos insaturados .....	173
6.2.1 Alquenos .....	173
6.2.2 Alquinos .....	177
6.2.3 Aromáticos .....	179
6.3 Clasificación de los aceites crudos .....	186
6.4 El gas natural .....	189
6.5 Hidratos de Metano .....	194
6.5.1 Formación de Hidratos de Metano .....	197

GENERACIÓN DE HIDROCARBUROS

---

CAPÍTULO VII LAS ROCAS GENERADORAS DE HIDROCARBUROS.....	199
7.1 Cuenca de Burgos.....	201
7.1.1 Jurásico Superior.....	202
7.1.2 Cretácico Superior.....	202
7.1.3 Terciario.....	203
7.1.4 Conclusiones sobre la Cuenca de Burgos.....	204
7.2 Cuenca Tampico Misantla.....	204
7.2.1 Jurásico Superior.....	205
7.2.2 Cretácico Superior.....	206
7.2.3 Cretácico Inferior.....	207
7.2.4 Conclusiones sobre la Cuenca Tampico Misantla.....	207
7.3 Cuenca de Veracruz.....	207
7.3.1 Jurásico Superior.....	208
7.3.2 Cretácico Superior.....	209
7.3.3 Oligoceno.....	210
7.3.4 Mioceno Inferior y Medio.....	210
7.3.5 Conclusiones sobre la Cuenca de Veracruz.....	210
7.4 Cuenca del Sureste.....	211
7.4.1 Jurásico Superior.....	211
7.4.2 Eoceno Medio.....	212
7.4.3 Oligoceno Inferior.....	213
7.4.4 Mioceno Medio.....	214
7.4.5 Conclusiones sobre la Cuenca del Sureste.....	214
7.5 Cuenca de Sabinas.....	215
7.6 Cuenca de la Sierra de Chiapas.....	216
7.61 Cuenca del Golfo de California.....	216
7.7 Cuenca de Chihuahua y Tlaxiaco.....	217
7.8 Conclusiones.....	217
CONCLUSIONES.....	217
BIBLIOGRAFIA.....	220

## GENERACIÓN DE HIDROCARBUROS

### RESUMEN.

Desde el punto de vista químico, los hidrocarburos son cadenas de átomos de hidrógeno y carbono con enlaces sencillos, dobles o triples, son la fuente más importante para la generación de energía y para el caso de México es la fuente más importante de ingresos económicos. El petróleo y/o gas se originan por restos de organismos vegetales y animales que en grandes cantidades fueron depositados en Cuenclas Sedimentarias durante millones de años, siendo cubiertos posteriormente por secuencias estratigráficas, más jóvenes que causan cambios al incrementarse la presión y temperatura.

La materia orgánica está compuesta por moléculas orgánicas (carbón, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno) en forma monomérica o polimérica derivadas directa e indirectamente de la parte blanda de los organismos, las partes esqueléticas, tales como conchas, huesos y dientes no se incluyen. La materia orgánica acumulada y ubicada cerca de la superficie terrestre es sintetizada por medio de organismos vivientes y posteriormente depositada y preservada en los sedimentos; dependiendo de eventos geológicos posteriores, parte de la materia orgánica se puede transformar en hidrocarburos de aceite de diferente calidad.

Es importante comprender que a lo largo de la historia de la tierra las condiciones para la síntesis, deposición y preservación de la materia orgánica han cambiado notablemente. El surgimiento de la fotosíntesis en el Precámbrico constituyó un fenómeno mundial histórico en la producción de materia orgánica y por consiguiente en la formación de las rocas generadoras potenciales; este proceso es básicamente una transferencia del hidrógeno del agua al bióxido de carbono para producir materia orgánica, en forma de glucosa y oxígeno. El fitoplancton, el productor primario de materia orgánica, forma el miembro básico de la cadena alimenticia y consecuentemente, de la pirámide de la vida. La composición de los organismos vivos comprenden principalmente carbohidratos, proteínas, lípidos y ligninas; todos ellos contienen principalmente carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O) y nitrógeno (N); Los lípidos son los compuestos con mayor cantidad de Hidrógeno y Carbono, por lo que son los mejores precursores de los hidrocarburos. De los compuestos orgánicos se genera el Kerógeno, que después se transforma en aceite y/o gas de los yacimientos.

La roca generadora es aquella unidad sedimentaria con más del 1% de materia orgánica que ha generado o es potencialmente generadora de petróleo y/o gas; en esta roca se lleva a cabo la migración primaria. La distribución de este tipo de secuencias en una cuenca sedimentaria, depende de las condiciones del paleorelieve y paleoclima reinante durante la época de depósito (paleogeográfica). En general cualquier roca que tenga un volumen importante dentro de una Cuenca Sedimentaria y contenga más del 1% de Carbono Orgánico Total (COT) puede ser considerada una roca generadora; todas las rocas generadoras son sedimentarias las más importantes son: lutitas, calizas arcillosas, lutitas calcáreas, margas y limolitas sus características distintivas son: textura fina (grano fino), depositada en medio reductor, de color oscuro, o negro.

Desde que se acumula la materia orgánica en un medio que favorece su preservación (ambiente reductor), se va cubriendo por sepultamiento y experimenta una serie de cambios junto con los sedimentos que la contiene,

# PAGINACIÓN DISCONTINUA

## GENERACIÓN DE HIDROCARBUROS

---

estos cambios o evoluciones se dividen en tres etapas: Diagénesis, Catagénesis y Metagénesis. La Diagénesis es la primera etapa de transformación de la materia orgánica, en esta etapa la actividad microbiana es uno de los principales agentes de transformación, se presentan reareglos químicos a poca profundidad y baja temperatura, (0° a 50°C y de 0 a 300 bares de presión respectivamente). En la Catagénesis se lleva a cabo el aumento de la temperatura por mayor sepultamiento en las cuencas sedimentarias. En esta etapa ocurre degradación térmica del Kerógeno, que es responsable de la generación de la mayor parte de los hidrocarburos, la temperatura es de 50° a 225°C y la presión puede ser de 300 a 1000 o 1500 bares. La Reflectancia de la vitrinita está entre 0.5 y 2.0. La etapa final denominada Metagénesis se alcanza solamente a gran profundidad, en esta última etapa de evolución de la materia orgánica da como resultado gas metagénico con reflectancia de vitrinita entre 2% y 4%; a mayor profundidad (más de 100,000m), ocurre el metamorfismo y la materia orgánica residual se transforma en metantracita y después en grafito.

Las rocas generadoras más importantes y ampliamente distribuidas de México corresponden a calizas arcillosas y lutitas calcáreas marinas en áreas de ambientes restringidos del Jurásico Superior, propiciados por la apertura del Golfo de México. La mayoría de los yacimientos de petróleo del Mesozoico están relacionados genéticamente con las rocas del Jurásico Superior, especialmente del Tithoniano. Algunos yacimientos provienen también de rocas generadoras de base del Cenozoico, asociadas a la regresión generalizada post deformación Laramídica.

### INTRODUCCIÓN.

El presente trabajo se elaboró como apoyo didáctico a los estudiantes de la asignatura de Geología del Petróleo, de noveno semestre, dentro del plan de estudios de la carrera de Ingeniería Geológica y como materia optativa del décimo semestre de la carrera de Ingeniería Geofísica.

La Geología del Petróleo es la aplicación de la Geología en la exploración y explotación de yacimientos del petróleo y gas. El avance de la Geología dentro de esta rama se puede considerar como muy importante, ya que se han realizado avances de gran nivel en ciencia y tecnología.

En la exploración y explotación la introducción de la Geología ha sido de gran utilidad para la industria petrolera, esta a su vez, incrementa significativamente su producción.

A través del tiempo la proyección de la Geología del Petróleo se ha extendido, ya que inicialmente en la exploración, los criterios geológicos se utilizaban, principalmente para encontrar los sitios favorables para la acumulación de hidrocarburos; posteriormente, la geología definió los tipos de ambientes favorables para la generación y acumulación de hidrocarburos, hoy en día juega un papel muy importante en la caracterización de los yacimientos y en la explotación óptima de los mismos.

En este trabajo se desarrollaron los temas importantes para comprender la generación de hidrocarburos, en los cuales, se realizó un análisis de la génesis, evolución, y características principales de las rocas generadoras en México, para tener conocimientos necesarios que permitan llevar a cabo una adecuada exploración y explotación, prevenir los efectos en el impacto ambiental y bosquejar sobre el futuro desarrollo de los recursos no renovables.

Este trabajo representa el resultado de las actividades académicas que realicé en la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, en el departamento de Geología del Petróleo y Geohidrología como parte de mi servicio social, ya que colaboré como ayudante de profesor de la asignatura de Geología de Petróleo.

## GENERACIÓN DE HIDROCARBUROS

Los objetivos de este trabajo son:

- Estudiar y comprender la génesis y parámetros importantes que intervienen en la generación de hidrocarburos.
- Contar con material didáctico actualizado, en el tema de generación de hidrocarburos, como apoyo didáctico de la asignatura Geología del Petróleo y asignaturas afines.
- Que el alumno de la materia de Geología del Petróleo disponga de material actualizado y en español sobre el origen, la evolución, y la generación de hidrocarburos.
- Describir las principales características de las rocas potencialmente generadoras de los yacimientos petroleros de México.

La metodología que se siguió en la elaboración del presente trabajo incluye las siguientes tres etapas:

En la etapa preliminar se llevó a cabo la recopilación de material bibliográfico, principalmente de la bibliografía propuesta por el plan de estudios, de la asignatura de Geología del Petróleo de la carrera de Ingeniería Geológica. En los cuales destacan por su amplio contenido de los temas a tratar los siguientes libros, revistas científicas, artículos, y páginas de internet:

- Berkowitz Norbert, 1997. "Fossil Hydrocarbons. Chemistry and Technology. Academic Press", United States of America.
- Bjorlykke Knut.1994. "Sedimentology and Petroleum Geology". Springer Verlag Berlin Heidelberg. Germany.
- Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, A.C.2001. "Subsistemas Generadores de México". Volumen XLIX, Nums. 1-2, enero-diciembre, México.
- Henriot J.P., and Mienert J. 1998. "Gas Hydrates: Relevance to world margin stability and climatic change". The Geological Society, Special publication No.137, United States of America.
- Hunt, M. John. 1996 "Petroleum Geochemistry and Geology". W. H. Freeman and Company, Second Edition, New York.
- Jahn, f., Cook Mark and Graham Mark. 1998. "Hydrocarbon Exploration and Production". Elsevier, United States of America.
- Ki Kenneth Londres, "Geología del Petróleo", 2ª ed., Ed. Omega,1972.

## GENERACIÓN DE HIDROCARBUROS

- Link k. Peter. 2001. "Basic Petroleum Geology". Society of Petroleum Engineers, OGCI United States of America.
- Pemex, Exploración y Producción. 1993 "Las Reservas de hidrocarburos de México", Vol. I y Vol II. Pemex, México, D.F.
- Schumacher Dietmar and Abrams A. Michael. 1996. "Hydrocarbon Migration and its Near-Surface Expression". Memoir 67, American Association of Petroleum Geologists (AAPG).
- Surdam C.R. 1997. "Seal Traps, and the Petroleum System". Memoir 67, American Association of Petroleum Geologists (AAPG).
- Tissot P.B., Welte D.H., "El Petróleo su origen y formación". 1ª ed, Ed. Conacyt, México 1978.
- <http://cultura.cientificarevistaoctanaje/htm>
- <http://www.alfinal.com/petroleo/index.shtml>
- <http://www.imp.mx/>

Posteriormente se realizó el análisis minucioso de la información que cumpliera con información completa, actualizada y de comprensión simple, apoyados en diagramas, dibujos, esquemas y tablas. En la etapa intermedia, debido a que en los diferentes temas desarrollados se cuenta con una vasta información, se sintetizó, incluyendo los conceptos necesarios para un mejor estudio sin omitir elementos importantes. Llevando acabo el siguiente orden:

- **La Génesis y Evolución de hidrocarburos:** Teorías orgánicas e inorgánicas, principales autores y sus aportaciones. Importancia de la materia orgánica como fuente primordial en la generación de hidrocarburos, su acumulación, y preservación.
- **Generación de hidrocarburos:** Parámetros y factores geológicos importantes, características físicas químicas y biológicas de las rocas generadoras, el origen, tipos, e importancia del Kerógeno, hidrocarburos líquidos y gaseosos, aceites crudos, gas natural e hidratos de metano.
- **Las rocas generadoras de hidrocarburos de México.**

En la etapa final, se llevó acabo la redacción del texto que fuera claro y completo. Se confirmó que los temas estuvieran completos, con gráficas, tablas y esquemas correspondientes, así como que éstos siguieran un orden para fácil análisis y comprensión. Sin perder de vista los objetivos propuestos.

## CAPÍTULO I. IMPORTANCIA DE LOS HIDROCARBUROS.

Un problema fundamental que se presenta en la exploración petrolera de un área en particular es el reconocer el origen y tipo de los materiales que dieron lugar a los hidrocarburos, los ambientes de depósito, así como cuáles fueron las condiciones físico-químicas (presión, temperatura, acidez, etc.), a los que fueron sometidos en su proceso de maduración.

La labor del geólogo es principalmente interpretativa, realizando trabajo de campo y gabinete. Para lograr los objetivos se requiere una sólida preparación en lo que al área se refiere, así como un firme conocimiento de asignaturas afines, también requiere de una constante actualización.

Como alumnos de Ingeniería en Ciencias de la Tierra o como Ingenieros Geólogos, Geofísicos y Petroleros, es necesario conocer la ocurrencia, propiedades y fenómenos que propician a la acumulación de hidrocarburos en el subsuelo. Así como también los métodos de investigación geológica y geofísica para la exploración petrolera.

Si bien la importancia del petróleo y el gas atañe a todos los países, sean productores o no, la producción de los mismos, se encuentra concentrada en unos cuantos, entre ellos México.

La energía es un elemento esencial de nuestra civilización, es un recurso de gran importancia en el consumo de energía en el ámbito mundial. Los países industrializados consumen un 76% de energía con una población de 27%, mientras que los países en desarrollo consumen aproximadamente un 24% con una población de 73%. Lo que nos indica que en los países en desarrollo no se cubren las necesidades básicas de la población, ya que son un número muy grande de personas que demandan cada vez más satisfactorios. (Figura 1). Es importante estudiar y comprender la generación de hidrocarburos para conocer y explotar de manera eficaz los yacimientos, ya que la evolución de la sociedad viene marcada por una mejora de las condiciones de vida del hombre, como resultado de su creciente dominio sobre los recursos energéticos y otros recursos.

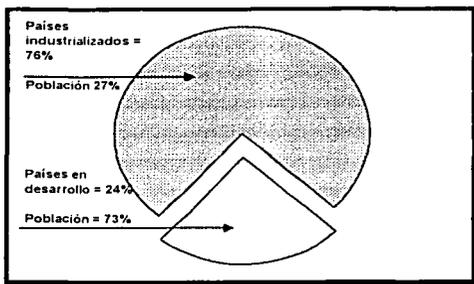


Figura 1. Consumo mundial de energía. (Zamarripa M. "Recursos y Necesidades de México". 2002).

La energía se obtiene de diferentes fuentes, las cuales clasificamos como recursos; estos se definen como aquellos bienes o medios de subsistencia necesarios para la población.

Son muy variados y la gente los obtiene directamente de la naturaleza, los recursos naturales son renovables y no renovables.

Recursos Naturales

- Renovables: Clima, flora, fauna, suelo.
- No Renovables: Carbón mineral, Petróleo, y energía nuclear

### 1.1 Recursos naturales renovables.

Son aquellos que tienen capacidad o posibilidad de perpetuarse o dependen de ciclos naturales, los más importantes son:

Viento: Se utilizó desde tiempo atrás para movimiento de embarcaciones molinos de viento, extracción de aguas de pozos, mover pequeños molinos para triturar grano; es un recurso poco usado en México.

Hidráulica: Es la Utilización del movimiento del agua para generar energía eléctrica o para mover mecanismos para diversos usos industriales.



**Solar:** Se utilizó la energía del sol para transformarla en otro tipo de energía pero aún no se ha desarrollado un procedimiento práctico para producirla en gran escala; la mejor alternativa parece ser la pila solar.

**Mareas:** En los lugares donde se tienen estuarios donde la marea es alta se utiliza la energía de las olas para mover turbinas y producir energía eléctrica. (Es práctica para más de 3m. de altura en las mareas; Francia, EE.UU. e Inglaterra.). En México en zonas costeras casi no hay mareas altas (menos de 1m.), lo cual no se presta a la utilización de este sistema.

**Térmica de los mares:** Cuando una corriente de agua caliente se junta con una masa de agua fría, se produce gran cantidad de vapor (en los mares). En México, tal fenómeno no acontece; en Francia si se ha podido lograr su aprovechamiento.

**Biomasa:** Es toda la materia orgánica formada por árboles, arbustos, residuos forestales, pastos, cultivos, residuos de cultivos, plantas acuáticas, desechos animales, desechos urbanos e industriales. Esta forma de energía fue utilizada desde el hombre primitivo y se sigue utilizando principalmente en las zonas rurales.

#### 1.2 Recursos naturales no renovables.

Son aquellos que su explotación es mayor que su producción. Los cuales se clasifican como:

**Carbón mineral:** Se incrementó la extracción o explotación en los siglos XVI-XVII-XVIII y en este último fue la base de la Revolución industrial. Su uso sigue siendo de gran importancia en el mundo. En México se utiliza en la región Norte para producir energía eléctrica.

**Hidrocarburos. Petróleo y Gas natural.** Desde principios del siglo XX es el que más se usa en el mundo, aproximadamente representa el 50% de la energía primaria y en México llega su consumo al 90%; se utiliza en industrias,

transporte, uso doméstico y comercial. Es la principal forma de energía utilizada en el ámbito mundial.

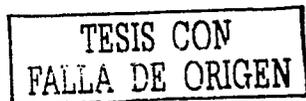
Geotérmica. En algunos lugares agua o vapor de agua a temperatura muy elevada; se utiliza para mover turbinas y para sitios de recreación. En México tenemos como fuente de energía geotérmica al eje neovolcánico, que no se ha aprovechado totalmente, también se tiene en el norte de la Baja California, que se esta aprovechando parcialmente.

Nuclear. Se produce gran cantidad de energía que se utiliza actualmente por la generación de energía eléctrica. Mediante la fisión o fusión del átomo de uranio. La utilizan los países desarrollados y pocos países en vías de desarrollo.

En la tabla 1.1 observamos la clasificación de los recursos renovables y no renovables, los cuales ya se han descrito de manera breve como fuentes principales de energía; se destaca la importancia que tienen en México los recursos no renovables y en especial los hidrocarburos (petróleo y gas natural) con un 88.90%. Este porcentaje aumentará conforme crece la población y la demanda, ya que los hidrocarburos son esenciales en el desarrollo de un país, principalmente se utiliza en: transporte, industria, agricultura, actividades domésticas, y servicios.

RENOVABLES	NO RENOVBLES	
1 Viento	7 Carbón mineral	
2 Hidráulica	8 Hidrocarburos (aceite y gas natural)	
3 Solar	9 Geotérmica	
4 Mareas	10 Nuclear	
5 Térmica de los mares		
6 Biomasa		
Participación de la energía primaria en México 2002		
Petróleo	69.70%	Gas Natural 19.20%
Biomasa	3.70%	Hidroenergía 3.60%
Carbón	2.20%	Nuclear 1.00%
Geoterma	0.60%	

Tabla 1.1 Recursos energéticos renovables y no renovables. (Zamarripa M. Recursos y Necesidades de México 2002).



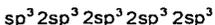
### 1.3 Características de los elementos que forman los hidrocarburos.

Los hidrocarburos son cadenas de átomos de hidrógeno y carbono son la fuente más importante en cuanto a la generación de energía por lo que a continuación se describirán las principales características de sus compuestos.

#### Carbono (C).

Es un elemento sólido que se encuentra en el Grupo IV en la Tabla Periódica de los elementos, con número atómico 6, Tetravalente (4 valencias) cuenta con una masa atómica de: 12.0115, un peso atómico de: 12.011 y se estima un porcentaje del carbono en los hidrocarburos de: 82-87%.

El átomo de carbono puede enlazarse a otros carbonos mediante enlaces que se clasifican como simples, dobles o triples, lo cual se debe a que este átomo al reaccionar con otro puede adquirir conformaciones híbridas:



Los compuestos de Carbono tienen las siguientes características básicas:

- Son bastantes estables debido a las energías de enlace C-C y C-H (356 y 414 KJ/mol, respectivamente).
- Poseen un número de átomos a menudo muy grande en sus moléculas.
- Poseen sistemas de cadenas abiertas o de cadenas cerradas.
- Son sustancias relativamente poco polares y no tienen la propiedad de ionizarse.
- Presentan reacciones lentas y reversibles.
- Poseen puntos de fusión y de ebullición bajas que aumentan progresivamente con el peso molecular.
- Contienen muchos isómeros.

Es importante aclarar que los isómeros son compuestos que presentan igual fórmula molecular pero diferentes fórmulas estructurales. Como se observa en la figura 1.2



El Hidrógeno es una mezcla de dos formas diferentes, ortohidrógeno (los núcleos giran en paralelo) y para hidrógeno (los núcleos no giran en paralelo). El Hidrógeno ordinario está compuesto de unas tres cuartas partes de ortohidrógeno y una cuarta parte de parahidrógeno, los puntos de ebullición y fusión de ambas formas difieren ligeramente de los del hidrógeno ordinario. El hidrógeno puro puede obtenerse por absorción del hidrógeno ordinario en carbón a una temperatura de  $-225\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

El hidrógeno tiene dos isótopos, el núcleo de cada átomo de hidrógeno ordinario está compuesto de un protón.

El Deuterio, está presente en la naturaleza en una proporción de 0.02%, contiene un protón y un neutrón en el núcleo de cada átomo y tiene una masa atómica de dos.

El Tritio es un isótopo radiactivo e inestable, contiene un protón y dos neutrones en el núcleo de cada átomo y tiene una masa atómica de tres.

El Hidrógeno en estado libre sólo se encuentra en muy pequeñas cantidades en la atmósfera, aunque en el espacio interestelar abunda en el Sol y otras estrellas, siendo de hecho el elemento más común en el Universo.

En combinación con otros elementos se encuentra ampliamente distribuido en la Tierra, en donde el compuesto más abundante e importante del hidrógeno es el agua; ( $\text{H}_2\text{O}$ ), se halla en todos los componentes de la materia viva y de muchos minerales así como también es parte esencial de todos los hidrocarburos y de una gran variedad de otras sustancias orgánicas. Todos los ácidos contienen hidrógeno; una de las características que define a los ácidos es su disociación en una disolución produciendo iones hidrógeno. El Hidrógeno reacciona con una gran variedad de elementos no metálicos, se combina con nitrógeno en presencia de un catalizador formando amoníaco, con azufre para crear sulfuro de hidrógeno, con cloro produce cloruro de Hidrógeno y con Oxígeno da como resultado agua, para que se produzca la reacción entre Oxígeno e Hidrógeno a temperatura ambiente se necesita la presencia de un catalizador como el platino finamente dividido, si se mezcla con aire u Oxígeno y se prende, explota. También se combina con ciertos metales como sodio y litio, formando hidruros, actúa como agente reductor de óxidos metálicos como el óxido de cobre, extrayendo el oxígeno y dejando el metal en estado puro.

El Hidrógeno reacciona con compuestos orgánicos insaturados formando los compuestos saturados correspondientes.

Se obtiene en el laboratorio por la acción de ácidos diluidos sobre los metales, como el zinc, y por electrólisis del agua; industrialmente se producen grandes cantidades de hidrógeno a partir de los combustibles gaseosos, se separa del vapor de agua, del gas natural y del gas de hulla bien por licuación de los demás componentes del gas o bien por conversión catalítica del monóxido de carbono en dióxido de carbono, donde resulta fácilmente extraíble.

El Hidrógeno es un producto derivado importante de muchas reacciones de electrólisis, se emplean grandes cantidades de hidrógeno en la elaboración del amoníaco y en la síntesis de alcohol metílico.

La hidrogenación de aceites para producir grasas comestibles, la del carbón mineral para producir petróleo sintético y la que tiene lugar en el refinado del petróleo, requieren grandes cantidades de hidrógeno.

Es el gas menos pesado que existe y se utiliza para inflar globos y dirigibles, sin embargo arde fácilmente y varios dirigibles, como el Hindenburg, acabaron destruidos por incendios.

El helio tiene un 92% de la capacidad de elevación comparada con el Hidrógeno y además no es inflamable, se emplea en su lugar siempre que es posible. Normalmente se almacena el hidrógeno en cilindros de acero bajo presiones de 120 a 150 atmósferas.

#### 1.4 Historia del Petróleo en México.

En la industria petrolera mexicana pueden distinguirse dos etapas históricas:

- Primera. La anterior a la expropiación petrolera.
- Segunda. Después de expropiación, de 1938 hasta nuestros días.

La evolución de la industria petrolera mexicana ha sido con tendencias crecientes.

Después de la expropiación existe un ascenso en la producción del petróleo ya que ha sido afectada por las condiciones económicas de la industria petrolera mundial, sobretodo a partir de 1973 en que los parámetros se hicieron cambiantes y erráticos.

Lo anterior es desfavorable a México ya que a fines de la década de los setentas, se hicieron grandes inversiones para incrementar la producción de

hidrocarburos y en 1982 cuando se logró dicho incremento se derrumbaron los precios del petróleo. Apartir de 1996 se ha mantenido un incremento constante en la producción a partir del modelo económico (tabla 1.2). y desde el año 2000 se está planteando permitir inversiones extranjeras en PEMEX, lo que se concreta a partir de 2003 en los servicios de contratos múltiples.

Antes de la Expropiación		Después de la Expropiación		Promedio Diario
Años	Millones de Barriles	Años	Millones de Barriles	Millones de Barriles
1901	0.01	1947	57.70	0.16
1911	12.60	1957	92.20	0.25
1921	193.40	1970	180.00	0.49
1931	33.00	1977	358.00	0.97
1937	46.90	1982	1002.00	2.75
1938	38.90	1987	927.00	2.54
		1990	930.00	2.55
		1994	980.40	2.69
		1996	1046.00	2.86
		1998	1120.90	3.07
		1999	1060.70	2.91
		2000	1147.70	3.13

Tabla 1 2 Producción anual, antes y después de la expropiación petrolera (Zamarripa M. Recursos y Necesidades de México. 1992)

Las primeras referencias históricas de la existencia de petróleo en nuestro país datan de la época de la conquista española, Fray Bernardino de Sahagún en su "Historia General de las Cosas de la Nueva España" (1558-1569), relata acerca de un material llamado "chapopoctli" del náhuatl, chíahuatl=grasa y poctli=humo, que derivó en la palabra castellanizada "chapopote".

Los antiguos habitantes de la región de la Huasteca lo usaban para revestir los pisos de sus embarcaciones, como medicina, pegamento, impermeabilizante e incienso para sus ritos religiosos. En la época de la Colonia se le da poca importancia, el chapopote se utiliza para combustión sin llegar a explotaciones más amplias.

Durante la guerra de Independencia no se dan las condiciones propicias para la exploración y no es sino hasta el efímero imperio de Maximiliano en el que se aprueban los primeros denuncios de "criaderos de petróleo" en 1864. En el siglo XIX numerosos autores mencionan la presencia de manifestaciones

superficiales de petróleo en la zona de Tuxpan (Crowter en 1868, reportó chapopoteras en la laguna de Tampamachoco).

En 1864 en las cercanías de Ebano, en San José de las Rusias y Chapopote, Tamaulipas, se otorgó al Sr. Idelfonso López la primera concesión para explotar petróleo a escala superficial. En el lapso 1890-1900, en el rancho denominado "Cubas", el Dr. Autrey descubrió un yacimiento, que denunció la Compañía "Exploradora del Golfo Mexicana", convirtiéndose en el primer yacimiento, explorado mediante perforación, sin embargo, no se tuvo éxito y fue abandonado.

En el año de 1901 la Mexican Petroleum Company en Ebano, alcanzó a producir 18,000 barriles. En 1903, Ezequiel Ordoñez descubrió el Campo Ebano y más tarde algunos de la Faja de Oro; él trabajó para la Huasteca Petroleum Company De 1904 a 1917. La Mexican Petroleum Company produjo cerca del Cerro La Pez (en el pozo Pez No. 1), la cantidad de 3, 669 000 barriles de petróleo, convirtiéndolo a la zona en la más productiva en 1910. En mayo de 1908 en el pozo San Diego No. 2, la Pearson reportó una producción de 2,500 barriles por día, siendo prácticamente este pozo el descubridor de la "Faja de Oro"

En 1908 la Pearson transfirió sus proyectos a una nueva compañía llamada Compañía Mexicana de Petróleo "El Aguila", reportando una producción de 5,000 barriles por día en la zona de Potrero del Llano, de aquí en adelante se daban cifras récord de producción a cada momento pues la East Coast Oil Co. Reportó 25,000 barriles diarios en el pozo Juan Casiano No. 7. La Tampico Oil Ltd. en 1912 llevaba a cabo el primer pozo importante en Mata Chapapote, en 1913 se descubrió el Campo El Alamo por la Penn Mex Fuel Company y el Campo Los Naranjos por la Aguila Company; en 1914 la Corona Petroleum Company perforó su primer pozo productivo en la zona de Pánuco, así como la Freeport and Mexican Fuel Company y más tarde, la Mexican Sinclair Corporation en Chijoles.

Everette Lee De Golyer Sr. realizó importantes estudios geológicos de la Faja de Oro desde 1916, lo que le valió el reconocimiento y homenaje por parte de la Asociación de Geólogos Petroleros de México, inclusive la Universidad Nacional Autónoma de México lo premió con un doctorado Honoris causa. A Golyer, se le atribuye una producción de 400 millones de barriles a la Faja de

Oro de los 537 millones producidos en el país de 1901 a 1920; para 1937 llegó a acumular una producción de 1,000 millones de barriles. Con todo esto se generó una sobre-explotación de los yacimientos ocasionada por errores en la forma de extracción, lo que provocó la caída de la producción en los campos de la Faja de Oro.

La Primera Guerra Mundial y sus repercusiones en los Estados Unidos (la falta de crudo), ayudaron al derrumbe de la Faja de Oro, por otro lado, esto también ocasionó que se retomaran otras zonas y se buscarán nuevos campos dentro de la Faja de Oro, apoyándose en las nuevas tecnologías como la geofísica, el avance del conocimiento paleontológico, la aviación, nuevos equipos y herramientas de perforación.

El resultado más importante de estas nuevas tecnologías fue el descubrimiento del Campo Poza Rica, una de las razones de no haberlo descubierto anteriormente fue debido a la profundidad de perforación (era del orden de los 500 a los 900 metros). Sin embargo, esto no suscitó un nuevo auge exploratorio debido a una sobresaturación del mercado, por otro lado, otras compañías iniciaron sus perforaciones como la Stanford en Tajín cerca de Papantla, aunque en 1938 sus operaciones se vieron truncadas por la expropiación petrolera, la cual fue originada por el mal trato, los míseros sueldos que percibían y a la discriminación de que eran víctimas los trabajadores que prestaban sus servicios en las distintas compañías petroleras que operaban en el país. Originalmente se organizaron pequeños grupos para reclamar sus derechos, pero estos eran reprimidos por pistoleros y guardias blancas al servicio de las compañías, lo que en lugar de aplacar el movimiento, generó un descontento mayor y la creación de un sindicato fuerte apoyado por casi toda la población. El presidente en turno, el general Lázaro Cárdenas, luego de una huelga que casi paralizó la actividad económica, trató de conciliar los intereses en pugna mediante un convenio para instaurar un Contrato Colectivo que regulara a toda la industria del petróleo. Obviamente este último no fue aceptado por las compañías, por lo que el asunto se trasladó a la Junta Federal de Conciliación y Arbitraje, y después de un minucioso estudio del problema se determinó que dichas compañías debían acatar las demandas de los trabajadores, sin embargo, las compañías no aceptaron y promovieron un amparo ante la Suprema Corte. El fallo de la Suprema Corte de Justicia de la

Nación no fue aceptado y las compañías entraron en franca rebeldía y en consecuencia, la noche del 18 de marzo de 1938, el presidente dio a conocer al pueblo de México por las estaciones de radio, el Decreto de Expropiación de la Industria Petrolera Mexicana por causa de utilidad pública, basándose en el Artículo 27 Constitucional.

Al 18 de marzo de 1938, se habían descubierto campos importantes y las reservas probadas eran de 1.2 millones de barriles. Los principales campos fueron: Ebano-Pánuco, Porción Norte de la Faja de Oro, Poza Rica, Tonalá, Cuichapa y el Plan dentro de la cuenca Tampico – Misantla.

Cuando México nacionalizó sus recursos petroleros y se creó Petróleos Mexicanos, el panorama era sumamente complicado, ya que había una gran carencia de recursos humanos preparados, tecnología, equipos actualizados, información técnica y además estaba sujeto a un boicot internacional.

En los primeros años posteriores a la expropiación se continuó el trabajo exploratorio aunque a una escala muy modesta. Se inició la compilación y análisis de la información rescatada de las compañías y se desarrollaron estudios geológicos y geofísicos en escala regional y local.

Después de la Segunda Guerra Mundial, se repitió la escena de la primera, con escasez, elevación de precios pero con un impulso en la exploración, con la ventaja de que en esta ocasión también se incorporaron los adelantos tecnológicos desarrollados para la guerra; algunos ejemplos son las técnicas de localización submarina, la aviación, y los registros eléctricos de pozos.

En el año de 1943, por primera vez se pudo hacer una planeación integral de las actividades de exploración tomando en cuenta los recursos disponibles y las prioridades del país.

De acuerdo a esta planeación, se incrementaron los trabajos exploratorios en toda la Planicie Costera del Golfo de México y los estudios de reconocimiento geológico en Chihuahua, Coahuila, Baja California Sur, la Sierra Madre Oriental, la Sierra de Chiapas, Campeche y en la Península de Yucatán. Las políticas y estrategias que se establecieron en ese tiempo y los trabajos realizados dentro de ese marco dieron fruto en el corto plazo con los primeros campos descubiertos por PEMEX. El primero de ellos en 1945 fue el Campo Misión, productor de gas en la Cuenca de Burgos. A partir de esta fecha y en

un lapso de cuatro años se descubrieron: en la Cuenca de Burgos, los campos Camargo, Valadeces, Reynosa (el primer campo gigante productor de gas), Brasil y Francisco Cano. En la Cuenca Tampico - Misantla, los campos Moralillo, Alazán y Presidente Alemán. En las cuencas del Sureste los campos Acalapa, Mooacán, Sarlat, Tortugguero (primer campo marino) y Fortuna Nacional.

En la década de los cincuenta, se intensifican los trabajos exploratorios en las cuencas sedimentarias de la Planicie Costera del Golfo de México y en varios estados de la República, utilizando los conceptos y las tecnologías más avanzadas. En la cuenca de Burgos se descubrieron 24 campos productores de gas del Eoceno y Oligoceno, destacando los campos Monterrey, Treviño, 18 de Marzo, Lomitas y Culebra.

En la cuenca Tampico-Misantla se postula la tesis geológica de que la faja de Oro, considerada como una trampa estructural, es en realidad una gran trampa estratigráfica, constituida por un atolón arrecifal con una porción oriental en aguas del Golfo de México. En base a este concepto, se descubren en su prolongación sureste los campos Acuatempa, Santa Agueda, Ezequiel Ordoñez y Tecolutla, entre otros. Se obtiene por primera vez producción de hidrocarburos en rocas del Jurásico Superior en los campos Tamaulipas-Constituciones, San Andrés y Hallazgo. Se establece una nueva provincia petrolera al descubrirse el Campo Angostura, en el frente tectónico de la Plataforma de Córdoba. En la Cuenca Salina del Istmo se descubren los campos gigantes de la Venta, Magallanes y Ogarrio, asociados a domos salinos y el segundo yacimiento marino, Santa Ana.

En la Cuenca de Macuspana se descubrieron varios campos productores de gas, entre los que destacan: José Colomo (segundo campo gigante de gas), Chilapilla y Hormiguero, que generaron una gran producción y dieron lugar a la construcción de ciudad PEMEX.

En otras cuencas del país, como Chihuahua, Sebastián Vizcaino y Purísima-Iray de la Península de Baja California y en la Península de Yucatán se perforan pozos exploratorios que aportan información geológica importante para la evaluación de su potencial petrolero. Por otra parte, se continúa con los trabajos de reconocimiento en Coahuila, Sonora, Sierra Madre Oriental y Sierra de Chiapas.

En la década de los sesenta, en 1966 se crea el Instituto Mexicano del Petróleo y desde entonces hasta la fecha la participación de sus especialistas en los proyectos exploratorios de PEMEX ha sido un factor importante en los logros alcanzados.

En la Cuenca de Burgos se terminan 65 pozos exploratorios productores, destacando el descubrimiento de los campos Arcos, Arcabuz, Cuilláhuac, Oasis-Pandura, Mojarreñas y Santa Rosalía. En la porción marina de Tampico se descubre el Campo Arenque y al quedar productor el pozo exploratorio Isla Lobos se confirma la existencia de la Faja de Oro Marina, en la cual se descubren mas de 10 nuevos campos siendo el más importante el Campo Atún.

En la Cuenca Salina del Istmo y en Macuspana se terminan como productores más de 35 pozos exploratorios del Cenozoico que dan origen a nuevos campos de aceite y gas, destacando el campo gigante Cinco Presidentes y los Campos Blasillo e Ixhuatlán. En las estribaciones de la Sierra de Chiapas se terminó como productor de aceite el Pozo Cerro Nanchital (importante por ser el primer campo productor en rocas carbonatadas de Cretácico en el Sureste de México) y que constituyó un antecedente muy sólido para impulsar la exploración de las rocas mesozoicas en el subsuelo de toda esta región.

En el periodo de 1960 a 1972, la producción anual de hidrocarburos creció de 174 a 109 mmbpce y las reservas totales de hidrocarburos pasaron de 4,787 a 5,388 mmbpce.

En la década de los años setenta, los conceptos geológicos y las tecnologías evolucionan notablemente tales como: tectónica de placas, geoquímica, imágenes de satélite, geocronología, petrogénesis, secuencia genética de estratos, sismología stratigráfica, magnetoteluria, gravimetría aérea, perfil sísmico; permitiendo obtener más y mejor información, lo que se refleja en interpretaciones más precisas que contribuyen a mejorar el conocimiento geológico de las cuencas, tanto productoras como con potencial petrolero. Ellos dieron lugar a los éxitos más relevantes en la exploración petrolera del país.

En 1972, se descubren los yacimientos del Mesozoico de Chiapas – Tabasco al terminarse como productores de aceite y gas los pozos exploratorios Cactus-1 y Sitio Grande-1.

En 1974 se descubre una nueva provincia petrolera, la Cuenca de Sabinas, productora de gas seco en rocas mesozoicas, ubicada fuera del área tradicionalmente productora de la Planicie Costera del Golfo de México.

Se terminó el estudio estratigráfico-sedimentario de la Cuenca de Chicontepec, definiéndose el llamado Paleocanal de Chicontepec, que contiene la mayor acumulación de hidrocarburos *in-situ* de nuestro país.

Entre 1973 y 1976 se descubren en el frente plegado de la Plataforma Mesozoica de Córdoba los yacimientos de gas húmedo proveniente de rocas carbonatadas cretácicas. En 1976, con la terminación del Pozo Chac-1, se descubre la provincia productora de hidrocarburos más importante de México y una de las mayores del mundo, la Sonda de Campeche.

Desde fines de 1972 hasta mediados de los años ochenta, la Exploración estuvo dentro de las dos grandes provincias productoras recién descubiertas: el Mesozoico de Chiapas-Tabasco y la Sonda de Campeche, respectivamente. Los resultados son importantes, ya que se descubrieron varios campos supergigantes y gigantes. En rápida sucesión, y con éxito casi sin precedentes en el ámbito mundial, en un lapso de 13 años se descubren en la Provincia Mesozoica de Chiapas-Tabasco más de 40 campos productores de aceite y gas, destacando: el Complejo Antonio J. Bermúdez (con más de 5,000 mmbpce), Jujo Tecominoacán y Cárdenas (con más de 1,000mmbpce cada uno), y los campos: Sen, Cactus, Agave, Sitio Grande, Paredón, Muspac, y Girdaldas (con más de 500 mmbpce) y otros 10 campos, cada uno de ellos con reservas de más de 200 mmbpce.

Con el mismo éxito, en un periodo de 10 años en la Sonda de Campeche se terminaron 32 pozos productores que dieron origen a numerosos yacimientos de aceite y gas, destacando los complejos supergigantes de Cantarell, Ku-Zaap-Maloob y Abkatún-Pool-Chuc y el Campo Caan.

En relación con la exploración del Paleogeno y Neogeno, en la Cuenca de Burgos se terminan 20 pozos exploratorios como productores, pero sólo cuatro nuevos campos son de cierta importancia: Coridón, Alondra y Velero-Jaujaj. La exploración en el Golfo de California provocó expectativas estimulantes en 1981 al quedar como productor de gas en sedimentos Cenozoicos el pozo exploratorio Extremeño-1. Sin embargo, su posible atractivo disminuyó considerablemente al conocerse mejor la geología del área y por los resultados

obtenidos en los 22 pozos exploratorios más que se perforaron en el Golfo de California y la porción terrestre circundante, los que resultaron improductivos. En el período de 1987 a 1990, los resultados obtenidos en las áreas de evaluación de potencial, la pronunciada baja de precios internacionales del petróleo y los presupuestos cada vez más reducidos para Exploración obligaron a redefinir las políticas y estrategias. Se decidió disminuir las inversiones y las actividades operativas en aquellas áreas aún no productoras y consideradas como de mayor riesgo.

En la Sonda de Campeche en los últimos ocho años se han terminado 47 pozos exploratorios-productores, descubriéndose 23 nuevos campos, entre los que destacan: Ek-Balam, Sinan, Ital, My y Bolontiku, con reservas totales que varían entre 50 y 20 mmbpce, entre ellos el Campo Ayin, primero ubicado en un tirante de agua de 170m.

En el período 1991-1998, la producción anual de hidrocarburos creció de 1,310 a 1548 mmbce, un crecimiento muy sustancial, lo que se reflejó en las reservas totales de hidrocarburos, que disminuyeron de 65,000 a 57,700 mmbpce según el valor auditado al 31 de diciembre de 1998. Estos datos han cambiado al incorporarse los resultados del Pozo Cantarell 418 (antes Akal 2001), que constituye el éxito más reciente de Exploración, al confirmar plenamente la existencia del bloque cabalgado de la estructura de Cantarell (postulado desde hace casi una década). Ello conlleva al descubrimiento de un nuevo yacimiento de hidrocarburos de gran magnitud, cuyas reservas son de aproximadamente 1.400 mmbce.

**CAPITULO II. TEORIAS SOBRE EL ORIGEN DEL PETROLEO Y GAS.**

Las distintas teorías sustentadas para determinar el origen del petróleo fueron expuestas en diferentes tiempos, la más científica es de 1886. En las últimas cinco décadas, el avance sobre la génesis de los hidrocarburos, por medio de la información química, geológica y bacteriológica, ha permitido cancelar muchas teorías y acabar con los misterios de dicho origen.

Para comprender las características y origen de los hidrocarburos, es necesario resolver las siguientes interrogantes:

- a) ¿Cuál fue la procedencia de los elementos hidrógeno y carbono?
- b) ¿Cómo se acumulan estos materiales?
- c) ¿Cómo se da la transformación?
- d) ¿Cómo se sepultaron estos materiales?
- e) ¿Cómo se generó esta transformación de sólido a líquido o gas?
- f) ¿Cuál fue el ambiente que favoreció este cambio?
- g) ¿Cómo puede explicarse la complejidad química del petróleo?

Interrogantes que se resolverán con el desarrollo de este trabajo.

Las teorías que han tratado de explicar este problema se han dividido, de acuerdo a los materiales y procesos involucrados en dos grandes grupos:

1. **Teorías inorgánicas o minerales.**
2. **Teoría orgánica.**

**2.1 TEORÍAS INORGÁNICAS.**

Son las teorías que explican la formación del petróleo partiendo de reacciones geoquímicas entre el agua, el bióxido de carbono, metales, también carburos y carbonatos. Las teorías inorgánicas fueron esencialmente las hipótesis de fines de siglo XVIII y durante el siglo XIX, elaboradas principalmente por químicos. El principal sustento para las teorías de origen inorgánico radica en el hecho de que en el laboratorio, los hidrocarburos metano, etano, acetileno y benceno se han logrado obtener a partir de fuentes inorgánicas.

Las más importantes teorías inorgánicas son:

- A. **Teorías de los metales alcalinos** o de Berthelot (1886).
- B. **Teoría de los metales alcalinos modificada** por Byasson (1891).
- C. **Teoría de los carburos metálicos** o Teoría de Mendeeeff. (1897 - 1899).
- D. **Teoría de las emanaciones volcánicas** (1900).
- E. **Teoría postulada por Sabatier y Senders** (1902).
- F. **Teoría del origen cósmico** (1903).
- G. **Teoría por procesos subterráneos** de emanación o destilación (Gaedicke, "Teoría semi-orgánica", 1904).
- H. **Teoría de la caliza, el yeso y el agua** (1904).

A) **De los metales alcalinos o de Berthelot.** Supone que en el interior de la tierra existen metales alcalinos en estado libre, que el  $\text{CO}_2$  puede reaccionar con ellos formando carburos y que estos a su vez, reaccionan con agua para generar acetileno; demostró que si el acetileno se calienta a una temperatura de  $900\text{ }^\circ\text{C}$ , aproximadamente, se polimeriza en benceno ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ) y si el benceno se calienta en condiciones apropiadas pierde hidrógeno y los residuos se combinan para formar diplénil ( $\text{C}_{12}\text{H}_{10}$ ).

Los hidrocarburos de más alta graduación pueden ser generados del acetileno, producto de un incremento significativo de temperatura formando hidrocarburos más complejos. Todas las reacciones descritas en esta teoría pueden verificarse en el laboratorio, solo que la debilidad de la teoría de Berthelot, estriba en suponer que en la tierra existen metales alcalinos en estado libre.

B) **Teoría de los metales alcalinos modificada** por Byasson (1891). Byasson desarrolló una teoría fundamentada en la propuesta por Berthelot, pero él postula que los sulfuros de hierro deben ser sustituidos por metales alcalinos. Los sulfuros de hierro se encuentran en muchas secuencias ígneas y sedimentarias.

C) **Teoría de Mendeeeff.** En 1877, Mendeleiv presentó esta teoría basada en la presunción de que en la tierra existen carburos de hierro en estado nativo y que las aguas de infiltración, al reaccionar con estos carburos de hierro, podrían formar hidrocarburos. Se supone que esta teoría fue inspirada en los

experimentos de Hahn Cloez y Williams, quienes demostraron que los hidrocarburos podrían producirse tratando el hierro fundido y el ferromanganeso con ácidos y agua. Es dudoso que el agua necesaria para verificación de estas reacciones para infiltrarse lo suficiente para reaccionar con los carburos de hierro, ya que hay fundamentos para creer que la porosidad y las fracturas de las rocas tienden a desaparecer con la profundidad.

Las teorías de Berthelot y Mendeleeff se basan que en la tierra existen metales alcalinos y carburos metálicos, elementos cuya presencia en estado libre no se conoce todavía en la naturaleza, pues son muy inestables, y en caso de que hayan existido, debieron haber sido destruidos por la acción del agua. Además, son productos de altas temperaturas y por consiguiente su existencia estaría asociada o íntimamente ligada a fenómenos volcánicos. Los investigadores de las últimas décadas han descartado esta teoría, ya que la mayor parte de los yacimientos petroleros se encuentran muy alejados de las zonas de actividad ígnea.

**D) Teoría de las emanaciones volcánicas de Moissan (1900).** Se basa en el hecho de que algunos gases de las emanaciones volcánicas contienen pequeñas cantidades de hidrocarburos gaseosos. Por lo que se supuso que dichos gases son originados a grandes profundidades y por consiguiente son indicativos de la composición química de los elementos que constituyen el interior de la Tierra y de sus reacciones.

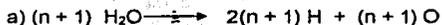
También postula que estos hidrocarburos gaseosos se condensan al aproximarse a la superficie y al decrecer la presión y temperatura, forman los hidrocarburos líquidos que originan los yacimientos actuales. Esta teoría es razonable desde el punto de vista especulativo, pero considerando los factores que gobiernan las acumulaciones de petróleo y a la actividad volcánica, revela la evidencia de que cuando se han encontrado yacimientos petrolíferos estos no tienen relación con actividad ígnea; cuando se han encontrado hidrocarburos cerca de volcanes extintos, de intrusiones o de diques, es porque estos ofrecieron un foco de acumulación importante (porosidad secundaria).

E) **Teoría postulada por Sabatier y Senders (1902).** En 1902, Sabatier y Senders produjeron una mezcla de hidrocarburos líquidos, con la intercalación de acetileno e hidrógeno con la presencia de una reducida catálisis de níquel y argumentaron que de esta forma se podría haber generado petróleo. El problema de esta teoría está en que no explican la procedencia del acetileno.

F) **Teoría del origen cósmico.** Es una de las teorías más antiguas, fundada en la hipótesis de que el petróleo y el gas formen parte constitutiva de la materia nebulosa original o de las capas de gases que envolvieron a la materia original, cuando se formó la tierra. La hipótesis continúa diciendo que conforme se iba enfriando el globo, el petróleo se precipitó de la atmósfera de gases y penetró en los poros de las rocas para llegar a constituir con el tiempo los yacimientos actuales. Uno de los principales apoyos de esta teoría es que en algunos meteoritos se han encontrado hidrocarburos en pequeña proporción y también se apoyan en que la composición de la tierra es similar a la de dichos meteoritos.

De acuerdo a esta teoría se tendrían yacimientos petroleros en cualquier tipo de roca y de cualquier edad, si embargo esto no sucede.

G) **Teoría por procesos subterráneos, de emanación o destilación** (Gaedicke, "Teoría semi-orgánica", 1904). Esta sugiere que el agua puede descomponerse en sus gases constituyentes debido a la acción de rayos gamma, emanados por minerales radiactivos. El hidrógeno libre puede unirse con carbón para dar origen a hidrocarburos.



El fundamento teórico esta sustentado en experimentos de laboratorio, sin embargo, es muy poco probable que este proceso ocurra en la naturaleza.

H) **Teoría de la caliza, el yeso y el agua.** Postulada en 1904, y supone que los carbonatos y sulfatos de calcio al estar bajo la acción de agua caliente forman hidrocarburos como los que constituyen el petróleo.

Las calizas, el yeso y el agua, existen en abundancia y están íntimamente

asociados en la naturaleza, por otra parte, contienen todos los elementos necesarios para la formación de hidrocarburos. Posiblemente bajo condiciones favorables de presión y temperatura, el petróleo se pueda formar de esta manera, pero las reacciones químicas en las que se apoya esta teoría no han sido explicadas satisfactoriamente.

## 2.2 TEORÍA ORGÁNICA.

Propone que el petróleo es originado por restos de organismos vegetales y animales. El fundamento de esta teoría se dio en diferente tiempo y por varios autores cuyas principales aportaciones son:

A) **B. Haquet Nurember (1790)**. Fue el primero en sugerir el origen orgánico del petróleo, él argumentó que el aceite de Galicia provenía de moluscos.

B) **Waksman (1933)**. Identifica a la lignina en aceites pesados, la que es característica de plantas terrestres; señala que los complejos húmicos y la lignina contienen estructuras heterocíclicas en anillos, similares a las de algunos aceites. Encuentra fósiles geoquímicos.

C) **Skinner (1952)**. Él concluyó que el vanadio en las porfirinas es de origen bioquímico, ya que fue encontrado en las holoturias, y que la presencia de porfirinas en algunos aceites que son componentes activos ópticamente, es una evidencia del origen orgánico del petróleo. De acuerdo a Skinner la fuente del petróleo son animales y plantas.

D) **Davis y Squires (1953)**. Encontraron que las bacterias metabolizan pequeñas cantidades de hidrocarburos no volátiles que incorporan a su estructura celular.

E) **Craig (1953)**. Descubre que el agua dulce y las plantas terrestres contienen menos  $^{13}\text{C}$  y más  $^{12}\text{C}$  que las plantas marinas, por lo tanto, la mayoría de hidrocarburos líquidos son derivados de materia orgánica marina. El material orgánico terrestre contribuye en menor proporción a la formación del aceite y más a la formación de gas.

F) **Francis (1954)**. Encuentra que el carbón mineral contiene productos sólidos y líquidos relacionados a los materiales encontrados en los petróleos pesados. También se encuentra gas metano asociado.

G) **Origen animal de Engler**. Supone que el petróleo se forma por putrefacción

de restos de animales, y que el nitrógeno es eliminado. La actividad de las bacterias anaeróbicas juegan un papel muy importante en estas reacciones. Engler divide este proceso en tres etapas: Primera etapa, los Depósitos de organismos de origen vegetal y animal se acumulan en el fondo de mares internos (lagunas marinas), las bacterias actúan, descomponiendo los constituyentes de los carbohidratos en gases y material solubles en agua, y de esta manera son desalojadas del depósito, permanecen los constituyentes de tipo ceras, grasas y otras materias estables, solubles en aceite. Segunda Etapa, a condiciones de alta presión y temperatura, se desprende  $\text{CO}_2$  de los compuestos con grupos carboxílicos, y  $\text{H}_2\text{O}$  de los ácidos hidroxílicos y de los alcoholes, dejando un residuo bituminoso; la continuación de exposiciones a calor y presión provoca un craqueo ligero con formación de olefinas (protopetróleo). Por último; en la Tercera Etapa los compuestos no saturados en presencia de catalizadores naturales, se polimerizan y ciclizan para dar origen a hidrocarburos de tipo nafténico y parafínico. Los aromáticos se forman, presumiblemente, por reacciones de condensación acompañando al craqueo y ciclización, o durante la descomposición de las proteínas.

H) **Origen vegetal de Hoffer.** Propone que el petróleo se forma por descomposición de vegetales acumulados bajo condiciones que previenen oxidación y evaporación de los productos químicos formados.

I) **Por procesos de laboratorio.** Los materiales orgánicos sólidos son convertidos en el laboratorio en hidrocarburos líquidos por combinación con hidrógeno libre, a grandes presiones y temperaturas en presencia de un catalizador adecuado como el nitrógeno.

### 2.3 Discusión.

La teoría más aceptada sobre el origen del petróleo es que éste fue formado a partir de materia orgánica, vegetal y animal, que en grandes cantidades fue depositada hace millones de años, siendo cubierta posteriormente por capas de sedimento, de suelo y rocas, que bajo el influjo de calor (gradiente geotérmico) y presión, (compresión litostática) logró finalmente la formación de los compuestos que forman los aceites llamados petróleo y los compuestos gaseosos asociados a ellos. Los compuestos que forman el petróleo son

moléculas basadas principalmente en los elementos carbono e hidrógeno, que reciben el nombre de hidrocarburos.

Además del carbono e hidrógeno, también se encuentran otros elementos que como el azufre, el vanadio, el nitrógeno, sólo constituyen proporcionalmente pequeñas cantidades del compuesto total. (generalmente menos del 1.0%).

Los hidrocarburos tienen moléculas de forma variada, siendo la más sencilla la compuesta por un solo átomo de carbono y cuatro átomos de hidrógeno, la que es llamada metano y tiene por lo tanto la fórmula química  $CH_4$  y es el principal componente del gas natural.

Dependiendo del número de átomos de carbono, las moléculas crecen y se van configurando estructuras cada vez más complejas, desde cadenas largas y sencillas, hasta anillos múltiples y complicados. Todos los seres vivos estamos constituidos por este tipo de moléculas por lo que reciben el nombre de orgánicas, así la química del carbono se le denomina también química orgánica.

Durante los últimos años se han desarrollado una serie de metodologías basadas en fósiles -residuos- nucleares y moléculas orgánicas (de origen biológico) que son llamados biomarcadores. Tal es el caso de residuos de la clorofila, que al romperse pueden darse dos compuestos: el fitano y el pristano, que vienen de una porción de la clorofila llamada fitol. Estas moléculas aunque se encuentran en cantidades pequeñas, pueden dar información relacionada tanto al origen como a los procesos responsables de la formación de hidrocarburos.

A partir de la procedencia de estos residuos como marcadores de los compuestos originales, se puede inferir cuáles fueron esos ingredientes, así como los procesos y cuánto tiempo ha transcurrido desde el inicio del depósito de esos componentes primarios, por lo que estos marcadores pueden ayudar a la exploración y explotación del petróleo dando mayor información sobre los tipos de material constituyente y sobre los ambientes de depositación de estos materiales.

Esto implica que el petróleo que proviene de material orgánico depositado en un ambiente pantanoso de laguna costera, será diferente al petróleo derivado de la acumulación de finos residuos biológicos en los océanos profundos, de tal

forma que ha sido posible identificar hidrocarburos correlacionándolos con otros aceites de yacimientos próximos o lejanos. También pueden usarse estas características del petróleo para identificar la roca generadora, que es origen a los hidrocarburos del yacimiento o campo petrolero. Estos conocimientos son de extrema importancia, ya que con frecuencia el petróleo no se encuentra en el lugar de su formación, sino se encuentra en otro lugar, en los poros de rocas llamadas almacenadoras, muchas veces distantes de las rocas generadoras. En la exploración del petróleo, los biomarcadores proporcionan información valiosa. Para poder estudiar de otra manera los residuos fósiles, debemos de pensar en que los elementos que constituyen las moléculas son, a su vez, formados por átomos. Los átomos que constituyen los elementos tienen el mismo comportamiento químico, pero pueden presentar pequeñas variaciones en su peso atómico, debido a diferencias en su estructura nuclear. Estos átomos reciben el nombre de isótopos, del Latín isos-igual y topos-lugar, y son átomos que ocupan el mismo lugar en la tabla periódica de los elementos, por ejemplo los tres isótopos principales del carbono, que son: carbono-12 ( $^{12}\text{C}$ ), carbono-13 ( $^{13}\text{C}$ ) y carbono-14 ( $^{14}\text{C}$ ), han sido utilizados en función a su abundancia relativa.

El isótopo  $^{14}\text{C}$  es un átomo radioactivo producido en la atmósfera por el bombardeo de rayos cósmicos y se introduce en el ciclo de la vida por medio de la fotosíntesis de las plantas. Durante la vida del organismo la cantidad de  $^{14}\text{C}$  permanece constante; a partir de su muerte la cantidad de  $^{14}\text{C}$  baja debido a su propio decaimiento radiactivo. Este hecho es la base para el método de fechamiento radiométrico, que nos ha sido tan útil para conocer la edad de muchos restos arqueológicos.

Otro aporte importante dentro de la exploración del petróleo, es la utilización de la información obtenida del estudio de la composición isotópica del carbono en el petróleo. Los isótopos  $^{12}\text{C}$  y  $^{13}\text{C}$  son estables y los principales constituyentes del elemento carbono. La pequeña variación en su peso, es la responsable de las diferencias encontradas en la composición isotópica del carbono en diversos materiales; dicha composición isotópica es el reflejo de las reacciones físico-químicas que producen los compuestos y pueden ser utilizadas para el estudio de esas reacciones. Por ejemplo, si la materia

orgánica es depositada en un ambiente de alta evaporación, es decir en una zona caliente, el aceite producido tendrá una composición isotópica diferente del aceite producido por materia orgánica depositada en un ambiente frío en el fondo del mar.

Así es como, el estudio de los fósiles nucleares y moleculares han apoyado en años recientes a la industria petrolera, en relación con la exploración de aceite y gas.

Como puede apreciarse, la investigación con relación al origen del petróleo y los desarrollos tecnológicos aplicados a la explotación del petróleo, tienen mucho más aplicaciones, ya que estos estudios también están siendo aplicados a la protección del medio ambiente.

Podemos concluir que la teoría orgánica es la que explica el origen de los hidrocarburos de los yacimientos petroleros, las razones más importantes además de las consideraciones anteriores son:

- a) El contenido de materia orgánica que tienen los sedimentos recientes y la gran cantidad de materia orgánica y de hidrocarburos que se encuentran hoy en los sedimentos de la Corteza Terrestre.
- b) En los restos orgánicos predominan el hidrógeno y carbono, que son los componentes de los hidrocarburos; el carbono y el hidrógeno predominan en los restos de materia orgánica, tanto de origen vegetal como animal. Además, cantidades menores pero aun importantes de carbono e hidrógeno y de hidrocarburos son continuamente producidas por los procesos vitales de plantas y animales; en consecuencia, una fuente abundante y ampliamente distribuida de los dos elementos esenciales del petróleo carbono e hidrógeno, es provista por materia orgánica.
- a) La presencia de nitrógeno y de porfirina en el pigmento del petróleo, es una evidencia del origen orgánico de los hidrocarburos, ya que el nitrógeno es un componente esencial en los aminoácidos y estos componen las proteínas, relacionándose las porfirinas con la clorofila. La circunstancia de que se haya encontrado que muchos aceites restos de pigmentos de porfirina, y el hecho de que casi todos los aceites contienen nitrógeno, son indicios más o menos directos del origen animal o vegetal, o de ambos, del petróleo; puesto que toda materia orgánica contiene tanto porfirinas como

nitrógeno. Las porfirinas aparecen en los asfaltenos y en las fracciones de medianas a pesadas antes de ser filtradas, cuando aún conservan componentes asfálticos. Las cantidades de porfirina varían, pero en la mitad de las muestras, provenientes de todas partes del mundo, el contenido de porfirina oscila entre 0.004 y 0.02 mg por cada 100g.

- b) La actividad óptica que presenta el petróleo es una propiedad típica de las sustancias orgánicas. La actividad óptica, el poder de rotar el plano de polarización de la luz, es una propiedad que presentan la mayor parte de los hidrocarburos y no se conoce que se dé en los aceites de origen inorgánico o en otros compuestos con la excepción del cinabrio ( $\text{HgS}$ ) y del cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ). El poder de rotación óptica no es uniforme a lo largo de toda la escala de destilación (productos de la refinación), pero es usualmente máximo en las fracciones que tienen puntos de ebullición intermedios. ( de 250 a 300°C). Se cree que la actividad óptica de la mayor parte de los petróleos se debe a la presencia de colesterol ( $\text{C}_{26}\text{H}_{45}\text{OH}$ ), que se encuentra tanto en la materia vegetal como en la animal.
- c) La presencia de fósiles geoquímicos que corresponden con moléculas orgánicas e incorporadas en los hidrocarburos. Estos fósiles geoquímicos comprenden con los lípidos (grasas animales y vegetales).
- d) En forma experimental se pueden generar hidrocarburos a partir de materia orgánica mediante rompimiento termal. En un sistema confinado y con incremento constante de temperatura parte de la materia orgánica se transforma en metano al romperse las moléculas. Cuando la materia orgánica es rica en lípidos también se pueden generar pequeñas fracciones de aceite.
- e) En las cuencas sedimentarias se tienen la mayoría de los yacimientos petroleros del mundo; casi todo el aceite y gas se encuentran en rocas sedimentarias o en sedimentos. Estos sedimentos son principalmente de origen marino y, en consecuencia la mayor parte el petróleo tiene que ver con ambientes marinos o relacionado con condiciones marinas. También se encuentran cantidades menores de petróleo en sedimentos de origen continental acumulado en condiciones anóxicas; en consecuencia podría aceptarse que este petróleo se originó dentro de las formaciones

continentales.

- f) El hecho de que a partir de estudios realizados en el laboratorio de geoquímica en rocas potencialmente generadoras de hidrocarburos asociados a campos productores, donde se han encontrado sustancias orgánicas se ha determinado que de estas rocas proceden el aceite y gas de los yacimientos.

En conclusión, por todas las evidencias señaladas se puede decir que los hidrocarburos de los yacimientos petroleros tienen origen orgánico.

**CAPITULO III. CICLO DEL CARBONO.**

El carbono es la base de la Química Orgánica, elemento fundamental que sustenta la vida en nuestro planeta. No sólo está presente en todos los organismos vivos, sino que también forma parte de gran cantidad de rocas sedimentarias que se elevan en las montañas o que se encuentran en el subsuelo. Sin embargo, en la atmósfera se encuentra en proporciones mínimas, esta pequeña cantidad no es nada despreciable y sus variaciones influyen directamente sobre el clima. Últimamente se habla mucho de la influencia atmosférica del  $\text{CO}_2$  por su relación con el cambio climático. El ciclo del carbono se puede dividir en por dos partes: primaria y secundaria. Parte primaria: En esta parte, se presenta una masa circulante de aproximadamente  $3.0 \times 10^{12}$  toneladas de carbono; esta parte del ciclo es el de gran circulación, la vida media del mismo va desde días hasta decenas de años e involucra a todos los organismos. Parte Secundaria: En esta parte se tiene un gran volumen de carbono orgánico constituido aproximadamente por  $6.4 \times 10^{15}$  toneladas de carbono orgánico, representado por la materia orgánica fija en las rocas, en los sedimentos, en los fósiles, así como en el carbón y kerógeno; Esta parte del ciclo es de circulación lenta, que va de decenas de años a millones de años. El carbono orgánico se recicla principalmente en la parte primaria. El cruce de la parte primaria a la parte secundaria corresponde a una pequeña fuga que equivale tan solo a 0.1% de la productividad orgánica primaria. Figura 3.1

Para poder determinar con exactitud la masa total de carbono orgánico necesario para efectuar el fenómeno de la fotosíntesis durante la historia del planeta, será indispensable considerar el carbono total, que se depositó en los sedimentos en las aguas oceánicas y lacustres (menor proporción) en las rocas, en la biosfera en la atmósfera y en la hidrósfera.

En la práctica se presenta la dificultad para separar lo "orgánico" de lo "inorgánico", ya que podemos observar que existe una relación estrecha entre el carbono "orgánico" y el carbono procedente de los "carbonatos" y otras rocas y minerales.

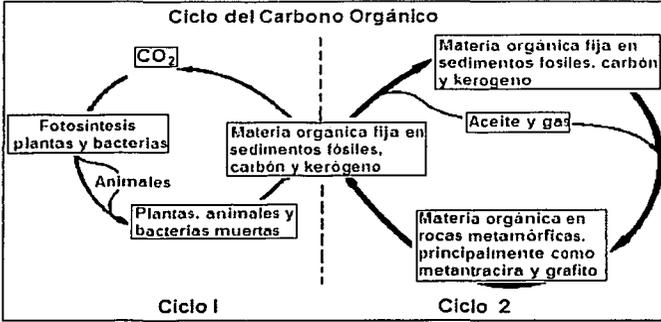


Figura 3.1 Ciclo del Carbono, Partes primaria y secundaria.

El bióxido de carbono procedente de la hidrósfera, precipita y produce el material necesario para que los organismos generen sus conchas, esqueletos y dientes. Estos organismos, al morir, van a constituir los sedimentos carbonatados, los cuales desprenden  $\text{CO}_2$ , que formará parte de la hidrósfera. En el año de 1970, Welte (Alemania), hace el cálculo de la cantidad total de carbono orgánico y de grafito acumulado en el mundo, el cual según esta persona equivale a  $6.4 \times 10^{15}$  toneladas; cantidad extraordinariamente grande. Se ha visto que la mayor parte del carbono orgánico se encuentra en las rocas sedimentarias de la corteza terrestre, este carbono orgánico se puede presentar en dos formas diferentes, de un 18 a 20 % se encuentra en forma reducida en compuestos orgánicos, y del 80 a 82 % en forma oxidada, como carbonatos (calizas, dolomias, calizas arcillosa etc.), formando parte de las conchas y esqueletos de los organismos. Es importante considerar la escasa distribución del carbono en la atmósfera terrestre donde el Nitrógeno ocupa un porcentaje mayor con 78%, seguido por el Oxígeno con 20.6%, y el restante por otros elementos que representan el 1.4%, que están constituidos con un porcentaje mayor de Argón, Vapor de agua y un porcentaje menor de  $\text{N}_2\text{O}$  y Ozono. Figura 3.2

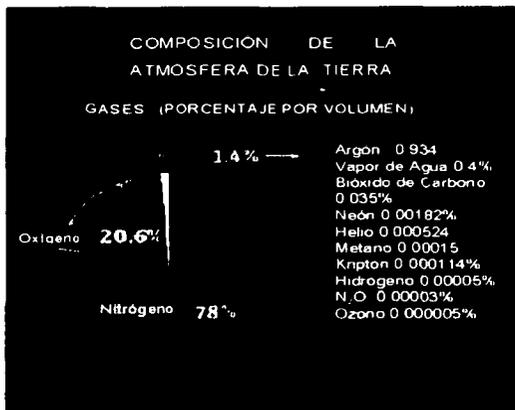


Figura 3.2 Distribución del carbono en la atmósfera terrestre

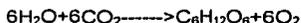
### 3.1 Fuentes de Carbono.

El carbono se encuentra distribuido en la atmósfera, hidrosfera, litosfera y biosfera terrestre, es producido por organismos sencillos y complejos, por procesos de combustión y descomposición, cambios climáticos y fenómenos geológicos; los cuales denominamos fuentes de carbono. Las principales fuentes de carbono y sus aportaciones son las siguientes:

**3.1.1 Plantas.** Se interpreta que las plantas fueron las responsables de crear la atmósfera actual, mediante la fotosíntesis toman el anhídrido carbónico de la atmósfera, asimilan el carbono y expulsan el oxígeno. De este proceso, aunque son muy importantes los pasos intermedios que permiten aprovechar la energía de las reacciones, y se resalta el balance que considera de los productos iniciales y finales:



de forma simplificada, o



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Para el caso concreto de la glucosa, también hay clorobacterias, bacterias thiorodaceas y athiorodaceas que no utilizan el agua como las que sede el hidrógeno y son anaerobias. No son abundantes, pero han sido fundamentales en la evolución de la Tierra creando el primer volumen de oxígeno gaseoso. Mediante estas reacciones los vegetales transforman la energía solar en energía química para desarrollarse y multiplicarse. La utilización de la energía almacenada como hidratos de carbono principalmente, se hace mediante la respiración.

Este proceso es básicamente el inverso a la fotosíntesis y se realiza tanto con luz como sin ella.



Así es importante conocer que las plantas también actúan como fuente de anhídrido carbónico y deshacen su propia labor. Pero no todo el carbono asimilado se utiliza como combustible de la respiración; una parte es utilizada en estructuras de sostén, como la lignina, o en ceras y resinas. Allí queda apartado del ciclo mientras viva la planta, este periodo puede ser muy largo en ecosistemas maduros.

Por último, algunos vegetales terminan fosilizándose y su carbono queda retirado de la circulación durante miles o millones de años. El oxígeno atmosférico es el resultado de una demora en el ciclo geoquímico de los productos de la fotosíntesis.

Esto se puede aplicar tanto a la flora terrestre como a la marina; pero hay que añadir algunas consideraciones que hacen especiales a las algas y el fitoplancton; estos son:

- El 70% de la superficie terrestre son mares, suponiendo que los océanos y los continentes tengan la misma capacidad para sustentar a las plantas, la aportación marina es mucho más importante.
- La actividad fotosintética en los mares es mucho mayor que en la tierra, esto se debe a que la producción no está limitada por la cantidad de luz disponible (las plantas sólo captan el 1% de la que llega) sino por la disponibilidad de  $CO_2$  y nutrientes. En la superficie marina el  $CO_2$  es más accesible porque está más concentrado, los 1'5 mol/kg del Pacífico sur es uno de los valores más bajos y equivale a 1'5 mol/l; En cambio las 350 ppm

de CO<sub>2</sub> atmosférico que consideran las estimaciones más altas, suponen  $1.5 \times 10^{-5}$  mol/l.

- En zonas con poca actividad biológica, los residuos caen al fondo o se disuelven en las aguas profundas quedando apartados de la cadena alimenticia y fuera de la zona de intercambio con la atmósfera. Estos restos tienen en su composición de 20 a 25 partes de carbono por mil porque, aunque las moléculas orgánicas constan de un 40% de carbono aproximadamente, los tejidos de las algas tienen más de un 90% de agua. Paradójicamente las zonas costeras son suministros a gran escala de Carbono, porque la abundancia de materia orgánica estimula el crecimiento de las algas.

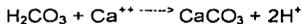
**3.1.2 Foraminíferos.** El mar es importante como fuente de carbono, ya que cuenta además del fitoplancton y el zooplancton como eslabón intermedio entre las algas y los sedimentos bentónicos. Al alimentarse, se limitan a utilizar el carbono que ya han fijado las plantas, pero sus excrementos están recubiertos por capas protectoras que les impiden disolverse y se depositan intactos en el fondo marino.

Por otro lado tenemos una de las fuentes primordiales, los foraminíferos, son seres unicelulares con esqueletos de carbonato cálcico o carbonato magnésico, que se acumulan en grandes depósitos minerales constituyendo la principal fuente de carbono.

Veamos el proceso de síntesis de los carbonatos, el CO<sub>2</sub> disuelto en el agua forma ácido carbónico:



Los foraminíferos toman los iones de calcio disueltos y forman las conchas de carbonato cálcico.



El hidrógeno desprendido juega un papel importante en la regulación del oxígeno atmosférico, también es importante considerar que, la formación de carbonato magnésico es idéntica:



**3.1.3 Materia orgánica disuelta.** Parece ser que algunos compuestos orgánicos que se encuentran disueltos en el mar reaccionan con el carbono; se trata de compuestos aromáticos (petróleo) e insaturados (lípidos) y colorantes.

**3.1.4 Fósiles geoquímicos.** Cuando se dan determinadas circunstancias naturales, la materia orgánica se fosiliza y queda inmovilizada durante millones de años en forma de combustibles fósiles; las fermentaciones anaerobias son menos efectivas que las aerobias y siempre dejan un residuo con carbono. Cuando los restos de animales y plantas caen en lechos pobres en oxígeno, la materia se acumula en depósitos negruzcos, por ejemplo, la turba. Esto suele ocurrir en zonas pantanosas porque la fina capa de agua se calienta fácilmente y pierde su oxígeno. Durante el carbonífero, hace 300 millones de años, abundaban los pantanos y mares poco profundos; además la vida era mucho más exuberante que ahora, por lo que la acumulación de restos orgánicos, fue muy rápida, en aquella época se formaron gigantescas capas de turba que después se convierten en carbón.

Cuando la turba queda sepultada bajo varios metros de sedimentos, la presión le hace perder el agua y los elementos volátiles, queda carbono compactado; es el carbón. Si la presión es suficiente, favorecido por el por un incremento significativo de calor el resultado es petróleo y/o gas.

Para hacernos una idea de la magnitud del proceso, en un pantano actual se acumulan 25 mm de turba cada 50 años y el espesor promedio de la capa es de 5 m.

**3.1.5 Animales.** Los animales y los hongos no pueden sintetizar partículas complejas a partir del dióxido de carbono, su alimento procede, directa o indirectamente, de los vegetales y obtienen la energía aprovechando las sustancias que han asimilado previamente. El proceso de respiración de animales y seres humanos son responsables de liberar  $\text{CO}_2$ , el carbono orgánico que habían ingerido.

**3.1.6 Combustión.** La combustión representa para fines prácticos con proceso similar el de la respiración: ocurre la oxidación de moléculas orgánicas que deja

como elementos finales anhídrido carbónico y agua. Las diferencias más significativas son que la combustión es muy violenta y la energía no se puede aprovechar para procesos biológicos; mientras que la respiración se hace por etapas, desprendiendo la energía en pequeñas porciones. Los combustibles son generalmente vegetales. El ser humano también quema con diferentes fines combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural. Pueden arder por causas naturales, como los incendios propios de algunos ecosistemas, o por mediación humana para colonizar terrenos o producir energía. Los combustibles fósiles están en el centro de la polémica la que se desarrolla sobre si se ha roto o no el equilibrio en el ciclo del carbono.

**3.1.7 Descomposición.** Todos los procesos de degradación inorgánica son oxidaciones aerobias, también se producen fermentaciones y putrefacciones anaerobias, que son menos efectivas que la respiración pero también liberan dióxido de carbono. La mayoría de ellas toman el oxígeno de las moléculas de agua y producen moléculas orgánicas más sencillas que las originales y anhídrido carbónico; veamos algunos ejemplos:

Fermentación alcohólica  $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$ .

Fermentación butílica:  $C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3CH_2CH_2COOH + 2CO_2 + 2H_2$

Respiración de parásitos intestinales  $C_6H_{12}O_6 \rightarrow C_5H_{10}O_2 + CO_2$

Los organismos anaerobios son una minoría, pero suman un eslabón a la cadena del carbono reduciendo la acumulación de residuos en los lugares donde no llegan los aeróbicos.

**3.1.8 Corrientes oceánicas frías.** Los gases son más solubles a bajas temperaturas y a altas presiones, así que el  $CO_2$  está más concentrado en las aguas profundas que en la superficie.

Como producto de los movimientos del agua de mar y evaluando su influencia en el intercambio de anhídrido carbónico, se puede considerar lo siguiente.

Partamos de una masa de agua superficial en una región polar, por su temperatura tendrá más  $CO_2$  que el agua de zonas templadas y tropicales; en los polos, la superficie marina está más fría que el fondo, así que tenderá a hundirse por ser más densa. Al hundirse aumenta la presión y disminuye el

efecto del aumento de temperatura.

Por otro lado la diferencia de temperaturas entre el ecuador y los polos crea en los océanos un movimiento convectivo. El agua fría se desplaza lentamente por el fondo tomando carbonato de los sedimentos calizos hasta que se ve obligada a emerger en la zona ecuatorial; durante el ascenso aumenta la temperatura y disminuye la presión, así que va desprendiendo  $\text{CO}_2$ . Éste pasa a aguas que ya están saturadas y termina vertiéndose a la atmósfera. El tiempo necesario para completar uno de estos ciclos es de aproximadamente mil años.

**3.1.9 Volcanes.** Ya se ha demostrado que el fondo marino recibe un aporte continuo de carbonato cálcico y magnésico, también se ha comprobado que tiene cantidades significativas de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Da la impresión de que las formaciones minerales son continuas, pero en la Tierra nada es permanente. En las dorsales oceánicas la corteza terrestre se hunde en el manto y una parte se transforma en magma. Las temperaturas que se alcanzan allí son suficientes para descomponer los carbonatos:



Se cuenta nuevamente con  $\text{CO}_2$  gaseoso. Los volcanes son otro mecanismo importante que se encarga de liberar  $\text{CO}_2$  a la atmósfera. Sus emanaciones pueden tener concentraciones superiores al 10%. Esto ocurre de manera más abundante en las dorsales oceánicas.

**3.1.10 Equilibrio.** La Tierra está constituida por cuatro capas geológicas superpuestas: la atmósfera, una capa de agua cálida, otra de aguas profundas frías y el agua del fondo oceánico. Cada una tiene distinta capacidad para almacenar diferentes sustancias; por eso varía su composición. Pero no están aisladas entre sí y cuando en alguna se rompe el equilibrio de sus constituyentes, lo restablece a costa de sus vecinas, produciéndose una reordenación de todo el sistema.

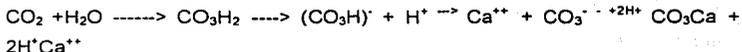
**3.1.11 Intercambio Tierra – Mar.** Los foraminíferos retiran el C, Ca y O del agua de mar y producen continuamente calcita, pero la solubilidad de esta aumenta con la presión; las aguas poco profundas se saturan fácilmente y la

calcita precipita, los aportes quedan formando sedimentos en el fondo. En aguas profundas estas se encuentran hiposaturadas y los caparazones que caen en ellas se disuelven rápidamente, existe una línea que marca la separación entre la zona que recibe más carbonatos de los que puede asimilar y la que no está saturada, esa línea se llama lisoclina.

La profundidad de la lisoclina depende de factores tan complejos como la actividad de los organismos productores de calcita, el equilibrio iónico del mar, temperatura, pH, etc. Por eso no es constante, cuando baja de nivel se forman precipitados calcáreos sobre sedimentos descalcificados y cuando sube, se disuelven los caparazones que yacían sobre el fondo.

Las corrientes oceánicas hacen subir aguas insaturadas sobre fondos de calcita, favoreciendo su disolución.

En algunos casos pueden ocurrir las siguientes reacciones de equilibrio:



Estas reacciones ocurren hacia la derecha cuando aumenta la presión parcial de  $\text{CO}_2$ , la temperatura es baja o aumenta el pH. Cuando las corrientes de agua fría llegan a una zona tropical de aguas cálidas y poco profundas, se calientan y quedan saturadas de anhídrido carbónico (aumenta el  $\text{CO}_2$ ), una parte se difunde a la atmósfera y otra forma precipitados de  $\text{CO}_3\text{Ca}$ .

**3.1.12 Intercambio aguas superficiales – profundas.** Debido a las diferencias de densidad y salinidad, prácticamente no se mezclan las aguas de menos de 800 m de profundidad y las inferiores; aunque se producen ligeros fenómenos de difusión entre ambas, los intercambios mayores ocurren cuando las corrientes ascendentes y descendentes transportan el agua a zonas con diferente presión y temperatura; entonces adquiere las propiedades físicas de la masa que la rodea y debe adaptar su composición química a la nueva situación.

**3.1.13 Intercambio océano – atmósfera.** En las aguas oceánicas se producen importantes procesos que toman el abundante  $\text{CO}_2$  disuelto y lo inmovilizan en forma de sedimentos; el anhídrido carbónico extraído tiene que reponerse de alguna forma, las capas inferiores no sirven como fuente de materia prima

porque es abundante pero está insaturada. La opción es recurrir a la capa superior, la atmósfera. Entre el aire y el mar se producen intercambios de gases en los dos sentidos, dependiendo de la concentración de cada uno en la zona de contacto; el trasiego se ve favorecido por la presencia de burbujas y oleaje que aumentan la superficie de contacto.

Las turbulencias de la atmósfera baja hacen que sea una capa bien mezclada y la concentración apenas varíe; en cambio en el océano aparecen muchas oscilaciones alrededor del punto de equilibrio. Estos picos y valles determinan el sentido del intercambio. (Figura 3.3)

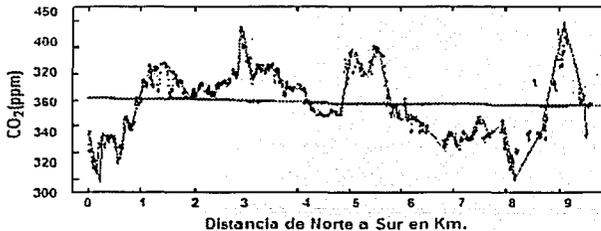


Figura 3.3 Comparación de CO<sub>2</sub> atmosférico con el marino, medidos en una travesía marina por el océano Índico.

**3.1.14 Ciclos reversibles desplazados.** El carbono abiótico está en nuestro planeta principalmente en forma oxidada, como CO<sub>2</sub> fundamentalmente; el biótico está, sobre todo, en forma reducida. El ciclo del carbono consiste en el paso de unas formas a otras y vuelta a reciclar. Aunque en la Tierra originaria todo el carbono era abiótico, ahora son muchísimo más abundantes las formas bióticas.

¿Cómo se explica que en algunas transformaciones cíclicas adquieran desproporcionadamente más peso unas fases que otras. La respuesta es la persistencia del carbono en la biosfera, todo el CO<sub>2</sub> asimilado por las plantas vuelve a la atmósfera pero lo hace de una manera lenta; el conducto de entrada es más ancho que el de salida; el carbono que no se utiliza mediante la respiración queda almacenado en los tejidos hasta que el último consumidor muere y se reincorpora a la atmósfera.

En un ecosistema de pastizales con herbáceas anuales, el ciclo dura pocos años; lo que tarda en descomponerse la paja o los herbívoros que la consumieron; en un bosque, la longevidad de los árboles hace que el carbono tarde cientos de años en volver a la atmósfera. En los ecosistemas marinos, las conchas y residuos que se acumulan en el fondo deben esperar millones de años hasta que los procesos geológicos los liberen; pero en zonas con mucha actividad biológica, como el Pacífico ecuatorial y los bosques tropicales, los residuos son consumidos antes de sedimentarse y su permanencia en estructuras orgánicas es muy breve. El tiempo medio de permanencia del carbono en la atmósfera es de 300 años y en el agua de mar es de 165,000 años.

Si disminuye la persistencia del carbono, la biosfera puede pasar de captadora de anhídrido carbónico a productora. El ciclo se mueve en los dos sentidos, es reversible, el hecho de que en los últimos 200 millones de años lo haya hecho en uno no quiere decir que no lo hiciera antes en el otro o lo pueda hacer en el futuro. Hay algunos estudios que indican una inversión de la tendencia en las dos siguientes zonas:

a) La tala de bosques y su sustitución por pastizales o cultivos con un ciclo de vida mucho más corto ha disminuido la persistencia. Si además la madera se quema, todo el carbono almacenado queda liberado instantáneamente.

b) La tundra ha sido un tradicional sumidero de dióxido de carbono, porque las plantas sólo permanecen activas cuando los días son largos, por lo que realizan la fotosíntesis casi continuamente; en invierno cuando hay oscuridad y sólo podrían respirar sin fotosintetizar, están muertas o con el metabolismo detenido. Un ligero aumento de la temperatura les permitiría permanecer activas cuando los días son cortos, pero a costa de quemar sus reservas y liberar el CO<sub>2</sub> que retienen.

**3.1.15 Balance.** Como se describió anteriormente, el carbono de la Tierra debe rondar los 25 millones de Gigatoneladas; la mayoría se encuentra en forma de sedimentos calcáreos formando betunes o en combustibles fósiles.

El 95% del carbono de la biosfera está en el mar y en la atmósfera hay unas 700 Gigatoneladas, el carbono retenido en los seres vivos debe rondar las 900 Gigatoneladas.

### 3.2 Evolución de la atmósfera.

Hace 4,000 millones de años la Tierra era totalmente diferente a lo que es ahora. Todo el oxígeno en forma mineral formaba óxidos, la atmósfera se componían de vapor de agua, anhídrido carbónico, nitrógeno y compuestos hidrogenados ( $\text{SH}_2$ ) procedentes en la mayorías de los casos de erupciones volcánicas. En estas condiciones aparecieron los primeros seres vivos en la Tierra, eran células anaerobias que se alimentaban de las moléculas orgánicas disueltas en el agua y se interpreta que surgieron hace 3,800 millones de años. Se tiene constancia de la existencia de estromatolitos de hace 3,500 o 3,200 millones de años.

Hace 2,800 millones de años aparecieron los primeros autótrofos fotosintéticos, las bacterias thiorodaceas, ya asimilaban  $\text{CO}_2$  pero todo el oxígeno que liberaban era captado por los iones ferrosos del agua. Se considera que 1,000 millones de años después, se agotó el hierro oxidable y el oxígeno empezó a pasar a la atmósfera; para entonces ya había plantas con enzimas mediadoras que les permitían un ciclo metabólico.

Cuando hace unos 1,400 millones de años la concentración de oxígeno alcanzó el 1%, aparecieron las primeras células eucariontas con metabolismo aerobio; 700 millones de años después aparecen los primeros metazoos. Desde entonces la vida ha aumentado en cantidad y diversidad sobre la Tierra, la proliferación de las plantas ha supuesto un aumento del  $\text{O}_2$  atmosférico y la consiguiente disminución de  $\text{CO}_2$ . Hace unos 300 millones de años, en el Carbonífero la exuberancia vegetal hizo disminuir el  $\text{CO}_2$  atmosférico hasta un diecisieteavo de la concentración actual. Se especula que la reducción del efecto invernadero pudo provocar la glaciación del Pérmico hace 225 – 280 millones de años.

La disminución de la actividad fotosintética representa posteriormente en un aumento del  $\text{CO}_2$  atmosférico hasta que la vegetación se recuperó hace unos 200 millones de años. Desde entonces no ha dejado de disminuir aunque con los altibajos correspondientes a las glaciaciones.

Se estima que hace 70 millones de años la concentración era diez veces la actual, pero hace 18,000 años debió ser un 70% de la actual.

### 3.3 Cambios actuales.

A partir de la revolución industrial, la combustión de fósiles ha detenido el proceso de disminución de carbono, de las 250 – 300 ppm de 1,850 se ha pasado a las 300 – 350 actuales; desde la revolución industrial en el año de 1850 hasta 1970 se observa un incremento que varía de 290ppm a 325ppm, y el aumento más notorio es del año 1970 a 1990 que va de 325ppm a 355ppm. Esto se demuestra en la figura 3.4 en donde a pesar de que se observa un aumento neto, hay variaciones estacionales.



Figura 3.4 Cambios en la concentración de bióxido de Carbono.

En el mar se producen oscilaciones de 200 mol/kg, aunque en el aumento intervienen los volcanes y los complejos equilibrios geológicos; la mayor parte en todo el globo terrestre se debe a la actividad humana en forma de combustión o a la tala de bosques.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**CAPITULO IV. Características de la materia orgánica y rocas generadoras.****4.1 Definición de materia orgánica y fotosíntesis.**

La materia orgánica está compuesta por moléculas orgánicas (carbón, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno) en forma monomérica o polimérica, derivadas directa e indirectamente de la parte blanda de los organismos, las partes esqueléticas, tales como conchas, huesos y dientes no se incluyen.

La materia orgánica tiene que ser sintetizada por medios de organismos vivientes y posteriormente depositarse y preservarse en los sedimentos; dependiendo de eventos geológicos posteriores, parte de la materia orgánica a se puede transformar a compuestos del tipo del petróleo.

Es importante comprender que a lo largo de la historia de la tierra las condiciones para la síntesis, depositación y preservación de la materia orgánica han cambiado notablemente.

El surgimiento de la fotosíntesis como un fenómeno mundial constituye un evento histórico notable con respecto a la formación de rocas generadoras potenciales; este proceso es básicamente una transferencia del hidrógeno del agua al bióxido de carbono para producir materia orgánica en forma de glucosa y oxígeno. El oxígeno se libera de la molécula de agua y no del bióxido de carbono; a partir de la glucosa los organismos autotróficos pueden sintetizar polizacáridos tales como: celulosa y almidón. Una forma simplificada de la ecuación de la reacción de fotosíntesis es presentada en la figura 4.1.

La glucosa, relativamente rica en energía, es formada por las plantas verdes con ayuda de la luz solar ( $h\nu$ ); el oxígeno es un subproducto del proceso.

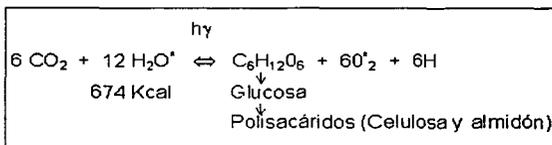


Figura 4.1 Ecuación de la fotosíntesis.

#### 4.2 Origen y Fuente de la materia orgánica: La fotosíntesis.

En la naturaleza existen elementos vivos y no vivos que la conforman; Los elementos vivos se denominan factores bióticos y corresponden a todos los seres vivos: animales, vegetales, bacterias y hongos; los elementos no vivos se llaman factores abióticos y corresponden al aire, suelo, agua y todas las condiciones del clima y de la luz. Ambos elementos son interdependientes y por lo tanto ningún ser vivo puede desarrollarse en forma aislada porque se debe relacionar con otros seres vivos y con el ambiente; esta relación permite que la materia (sustancias nutritivas) y la energía fluyendo a los seres vivos sea responsable de la vida en la Tierra. De todos los seres vivos, los fundamentales y que representan la fuente de materia y energía, son los vegetales clorofilados (tienen clorofila), ya que ellos son los únicos capaces de fabricar su propio alimento. Lo hacen a través del proceso llamado fotosíntesis, el cual ya hemos mencionado y a continuación describiremos sus características y componentes más importantes.

##### 4.2.1 La naturaleza de la luz.

La energía solar es la fuente de energía final de todas las transformaciones biológicas y reacciones bioquímicas en todas las células. La luz blanca se descompone en diferentes colores (color = longitud de onda) cuando pasa por un prisma; la longitud de onda se define como la distancia de pico a pico (o de valle a valle). La energía es inversamente proporcional a la longitud de onda, por lo que longitudes de onda larga tienen menor energía que las cortas. Como se muestra en la figura 4.2 donde se observan los picos y valles, así como su relación entre la velocidad (C) y el punto donde se mide la frecuencia (V).

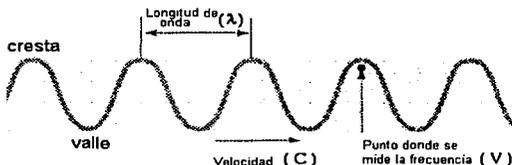


Figura 4.2 Longitud de onda.

La distribución de los colores en el espectro está determinada por la longitud de onda de cada uno de ellos; la luz visible es una pequeña parte del espectro electromagnético. Se explica mejor en la figura 4.3; cuanto más larga la longitud de onda de la luz visible tanto más rojo el color. Asimismo las longitudes de onda corta están en la zona violeta del espectro.

Las longitudes de onda más largas que las del rojo se denominan infrarrojas, y aquellas mas cortas que la violeta, ultravioletas.

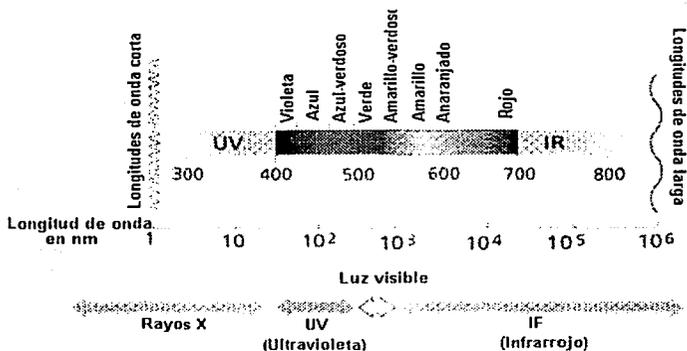


Figura 4.3 Relación de la luz visible en el espectro electromagnético.

La luz tiene una naturaleza dual: se comporta como onda y como partícula. Entre las propiedades de la onda luminosa se incluyen la refracción de la onda cuando pasa de un material a otro. El efecto fotoeléctrico demuestra el comportamiento de la luz como partícula. El zinc se carga positivamente cuando es expuesto a luz ultravioleta en razón de que la energía de las partículas luminosas eliminan electrones del zinc; estos electrones pueden crear una corriente eléctrica. El Sodio, Potasio y Selenio tienen longitudes de onda críticas en el rango de la luz visible. La longitud de onda crítica es la mayor longitud de onda (visible o no) que puede causar un efecto fotoeléctrico. Albert Einstein desarrolló en 1905 la teoría de que la luz estaba compuesta de

partículas denominadas fotones, cuya energía era inversamente proporcional a la longitud de onda de la luz. La Luz por lo tanto tiene propiedades explicables tanto por el modelo ondulatorio como por el corpuscular.

El color del pigmento esta dado por la longitud de onda no absorbida (y por lo tanto reflejada). Los pigmentos negros absorben todas las longitudes de onda que les llega, mientras que los pigmentos blancos reflejan prácticamente toda la energía que les llega. Los pigmentos tienen un espectro de absorción característico de cada uno de ellos; la longitud de onda está dada en nm. Un pigmento es cualquier sustancia que es capaz de absorber luz. (Figura 4.4).

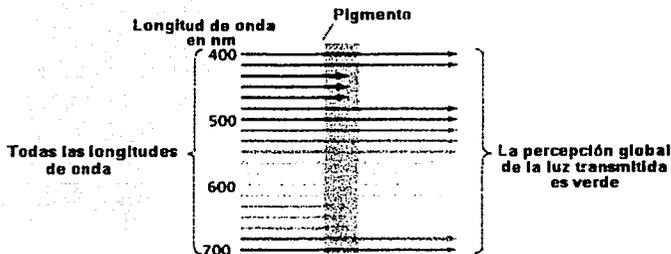


Figura 4.4 Color del pigmento y la longitud de onda.

La clorofila es el pigmento verde común a todas las células fotosintéticas, absorbe todas las longitudes de onda del espectro visible, excepto las de la percepción global del verde, detectado por nuestros ojos. El pigmento verde absorbador de la luz en las plantas es el prerequisite para la fotosíntesis. La cadena lateral de fitilo de la molécula de clorofila es una fuente importante de compuestos de cadena tipo isoprenoide en los sedimentos con materia orgánica y aceites. En la figura 4.5 se observan dos tipos de clorofila (a) y (b).

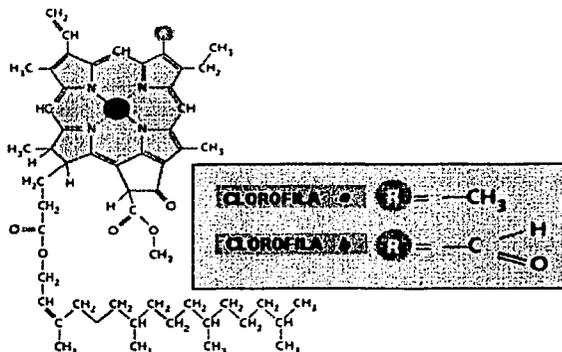


Figura 4.5 Molécula de la clorofila.

Tal como se observa en la fórmula (figura 4.5), la clorofila es una molécula compleja que posee un átomo de magnesio en el centro, mantenido por un anillo de porfirinas. Numerosas modificaciones de la clorofila se encuentran entre las plantas y otros organismos fotosintéticos (plantas, algunos protistas, proclorobacteria y cianobacterias).

Los pigmentos accesorios que incluyen a la clorofila b (también c, d, y e en algas y protistas) y los carotenoides, como la beta caroteno y las xantofilas (carotenoide de color amarillo), absorben la energía no absorbida por la clorofila.

La clorofila a (R = -CHO) absorbe su energía de longitudes de onda correspondientes a los colores que van del violeta azulado al anaranjado-rojizo y rojo.

Como se muestra en las figuras 4.6 y 4.7 en la imagen en donde se observa la molécula de la clorofila; el átomo de magnesio en el centro de color violeta, y el tipo de clorofila (a) representada por el color anaranjado-rojizo y rojo.



Figura 4.6 Molécula de la Clorofila.



Figura 4.7 Ejemplo de los carotenoides y la clorofila b, absorben en longitud de onda del verde.

La clorofila absorbe la luz en la región final del espectro (anaranjado - rojo), o sea en longitudes de onda larga y menor cantidad de energía; el origen de los organismos fotosintéticos en el mar se relacionan con esta característica. Las ondas de luz más cortas (y de mayor energía) no penetran mas allá de los 5 metros de profundidad en el mar. La habilidad para obtener energía de las ondas más largas (y penetrantes en este caso) pudo constituir una ventaja para las primeras algas fotosintéticas que no podían permanecer en la zona superior del mar todo el tiempo.

Si un pigmento absorbe luz, puede ocurrir una de estas tres cosas:

- La energía se disipa como calor, la energía se emite inmediatamente como una de longitud de onda más larga, fenómeno conocido como fluorescencia.
- La energía puede dar lugar a una reacción química como en la fotosíntesis.
- La clorofila solo desencadena una reacción química cuando se asocia con una proteína embebida en una membrana (como en el cloroplasto) o los

repliegues de membrana encontradas en ciertos procariontes fotosintéticos como las cianobacterias y ploclorobacteria. (ver figura 4.8). Esto permite que las algas y bacterias fotosintéticas vivan a diferentes niveles de profundidad en el mismo cuerpo de agua.

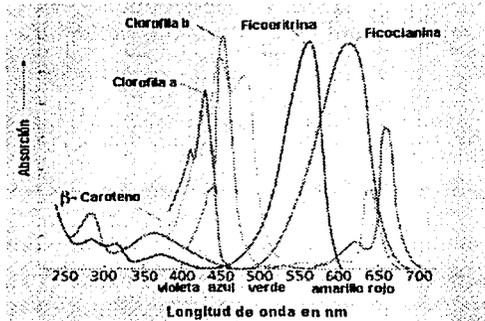


Figura 4.8 Diferentes partes del espectro de luz pueden ser utilizadas por distintos organismos fotosintéticos.

El tilacoide es la unidad estructural de la fotosíntesis. Las procariontes y eucariotas poseen sacos/vesículas aplanados en cuyo interior se encuentran los productos químicos que intervienen en la fotosíntesis. Solo los eucariotas poseen cloroplastos (figura 4.9) con una membrana que los rodea, en ellos observamos los siguientes elementos: Tilacoide, Grana, Espacio intermembrana, Membrana interna, Membrana externa y Membrana Tilacoide. Los tilacoides se apilan como tabiques y las pilas toman colectivamente, si se observa el esquema del cloroplasto y se compara con el de una mitocondria, notará que esta tiene dos sistemas de membrana mientras que el cloroplasto tiene tres, formando por lo tanto tres compartimentos. En los organismos autótrofos primitivos se encuentra en un estado relativamente libre en la célula del organismo, mientras que en las plantas más evolucionadas se concentra en cloroplastos en las hojas verdes, estos cloroplastos son fábricas fotosintéticas completas.

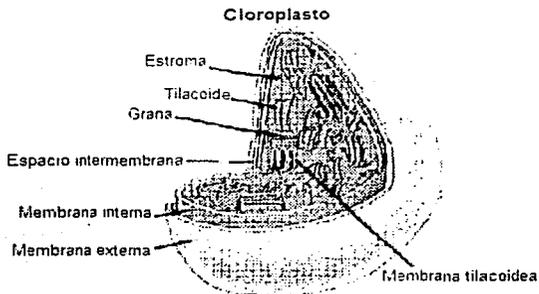


Figura 4.9 Componentes de los cloroplastos, elementos indispensables para la clorofila.

#### 4.3 Evolución de la materia orgánica

Las formas de vida más antiguas registradas tienen una edad aproximada de 3,300 millones de años y son bacterias y cuerpos del tipo del alga del Grupo Swaziland en África del Sur. Sin embargo, es posible que la vida en la tierra tenga una edad próxima al de las rocas más antiguas conocidas, es decir, 3,6 millones de años. Se supone que hace aproximadamente 2 mil millones de años la producción fotosintética de materia orgánica ya estaba bastante bien establecida en el ámbito mundial y esta época sirve como punto cero de referencia. Antes de que se alcanzara esto, posiblemente se requirieron otros mil millones de años para que las apariciones aisladas de los organismos primitivos se extendieran lo suficiente para que la fotosíntesis y consecuentemente, la producción en masa de materia orgánica, prevaleciera universalmente.

Sin agua no existe la vida, por lo tanto, una vida abundante, a un nivel más primitivo, no es posible en la tierra antes de aproximadamente cuatro mil millones de años, cuando el agua se transformó en una sustancia común en la superficie de la tierra. Durante este tiempo primordial, la atmósfera era reductora, es decir, prácticamente no había oxígeno libre; en la atmósfera primitiva de la tierra estaba exenta de oxígeno libre ya que contenía principalmente  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ ,  $N_2$  y  $H_2O$ . Cuando los organismos primitivos aparecieron inicialmente hace cerca de tres mil millones de años,

probablemente utilizaron las moléculas orgánicas producidas biológicamente como fuente de energía para el mantenimiento del metabolismo, en consecuencia se supone que los primeros organismos fueron heterotróficos. Sin embargo, la población creciente de heterótrofos probablemente no habría resistido para siempre de este modo, se ha argumentado que, cuando estos organismos casi agotaron la provisión de materia orgánica producida abióticamente, se desarrolló la fotosíntesis como una segunda fuente de energía. De esta manera, los organismos heterotróficos que fueron capaces de utilizar la luz solar como una fuente adicional de energía pudieron volverse independientes y con una evolución posterior pudieron escapar a la escasez de alimento, ciertas bacterias de coloración púrpura que viven en la actualidad muestran estas propiedades. Pueden actuar como heterótrofos y utilizar los compuestos orgánicos, también contienen el pigmento verde clorofila para realizar la fotosíntesis. La forma más antigua de fotosíntesis, tal como se efectúa por parte de las bacterias, no producía oxígeno, en lugar de hacer uso del  $H_2O$ , como donante del hidrógeno, pueden utilizar el  $H_2S$  y excretar azufre en lugar de oxígeno. Ciertas algas verdiazules que se desarrollaron de bacterias fotosintéticas posiblemente fueron los primeros organismos productores de oxígeno. Aún cuando existen diversos pigmentos fotosintéticos, ninguno puede sustituir completamente a la clorofila en los organismos fotosintéticos; las moléculas de la clorofila absorben energía luminosa, la cual lleva a los electrones a un nivel superior de energía. Esta ganancia de energía se transfiere a otras moléculas; se considera en un inicio el oxígeno era tóxico para los organismos, sin embargo, el medio ambiente reductor aseguró la abundancia de hierro bivalente en soluciones acuosas; este hierro pudo actuar como receptor del oxígeno producido como subproducto de la fotosíntesis. Los organismos fotosintéticos autotróficos fueron superiores a los heterótrofos y en consecuencia rápidamente, dominaron el reino biológico.

Se interpreta que hace aproximadamente dos mil millones de años se originó la fotosíntesis como fenómeno mundial, junto con la misma se estableció la base para la pirámide alimentaria para la evolución de las formas superiores de vida. Se argumenta que después de este evento, de forma lenta la atmósfera de la Tierra se volvió oxidante, el oxígeno molecular libre quedó disponible. En la

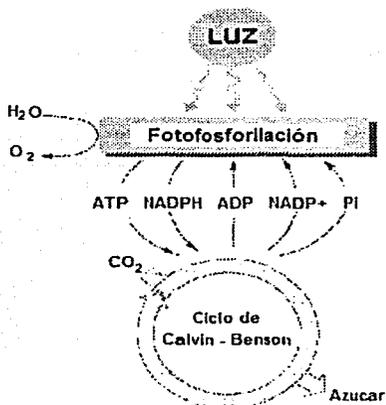
tabla 4.1 se presenta un resumen de los sucesos geológicos que se consideran de importancia en el Ciclo del Carbono orgánico. La producción en masa de la materia orgánica en la tierra no se presentó antes de dos mil millones de años, cuando se estableció la fotosíntesis como fenómeno mundial.

Cenozoico	Cuaternario	Reciente	50,000 años	Desarrollo del hombre moderno.
		Pleistoceno	1,000,000 años	Glaciación Aparición del hombre primitivo.
	Paleógeno y Neógeno	Plioceno	12,000,000 años	Desarrollo de las plantas modernas y animales.
		Mioceno	30,000,000 años	Óptimo desarrollo de los mamíferos gigantes. Formación de montañas (Alpes, Andes, ...etc.)
	Oligoceno	40,000,000 años	Desarrollo de los mamíferos superiores.	
	Eoceno y Paleoceno	60,000,000 años	Predominio de los mamíferos Aparición del caballo ancestral y de los simios.	
Mesozoico	Cretácico	120,000,000 años	Extinción de los dinosaurios Desarrollo de los mamíferos primarios y las plantas florales	
	Jurásico	155,000,000 años	Aparición de reptiles voladores y pájaros. Predominio de los dinosaurios Aparición de los mamíferos Abundancia de plantas coníferas	
	Triásico	190,000,000 años	Aparición de los dinosaurios. Predominio de los reptiles Aparición de las palmeras.	
Paleozoico	Pérmico	215,000,000 años	Desarrollo de los reptiles.	
	Carbonífero	300,000,000 años	Formación de estratos de carbón. Aparición de helechos, coníferas y reptiles. Desarrollo de los anfibios Abundancia de insectos	
	Devoniano	350,000,000 años	Abundancia de peces Aparición de los anfibios primitivos.	
	Silúrico	390,000,000 años	Aparición de los escorpiones y los primeros animales que viven en tierra firme. Desarrollo de extensos arrecifes	
	Ordovícico	480,000,000 años	Transgresiones y regresiones de mares poco profundos. Abundancia de vida marina invertebrada	
	Cámbrico	550,000,000 años	Mares de poca profundidad en toda la Tierra. Formación de rocas sedimentarias. Desarrollo de la vida invertebrada	
Precámbrico	Proterozoico	1,200,000,000 años	Formación de montañas y depósitos de mineral de hierro Abundancia de algas que excretan cal. Aparición de las esponjas.	
	Arqueozoico	2,000,000,000 años	Gran actividad volcánica. Formación de rocas ígneas. Aparición de algas microscópicas.	

Tabla 4.1 Sucesos de importancia para la evolución de la vida durante la historia de la tierra.

4.3.1 Etapas de la fotosíntesis

La fotosíntesis es un proceso que se desarrolla en dos etapas, la primera es un proceso dependiente de la luz (etapa clara), requiere de energía de la luz para fabricar moléculas portadoras de energía a usarse en la segunda etapa. En la segunda etapa que es independiente de la luz (etapa oscura) los productos de la primera etapa son utilizados para formar los enlaces C-C de los carbohidratos; las reacciones de la etapa oscura usualmente ocurren en la oscuridad si los transportadores de energía provenientes de la etapa clara están presentes. Evidencias recientes sugieren que la enzima más importante de la etapa oscura esta estimulada indirectamente por la luz, de ser así él termino no sería correcto denominarla "etapa oscura". La etapa clara ocurre en la grana y la oscura en el estroma de los cloroplastos. En esta etapa figura 4.10 se muestra la etapa clara del fenómeno de la fotosíntesis, es donde la luz actúa liberando al oxígeno de la molécula del agua en donde la fotofosforilación es el proceso por el cual el electrón emite energía al reaccionar con la luz.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 4.10 Primera etapa (etapa clara) del fenómeno de la fotosíntesis.

En la primera etapa (etapa clara) la luz que actúa en la clorofila excita a un electrón a un nivel energético superior, en una serie de reacciones la energía

se convierte (a lo largo de un proceso de transporte de electrones ) en ATP y NADPH. El agua se descompone en el proceso liberando oxígeno como producto secundario de la reacción, mientras que el ATP y el NADPH se utilizan para fabricar los enlaces C-C en la etapa oscura.

En la segunda etapa (etapa oscura), el anhídrido carbónico de la atmósfera (o del agua en los organismos acuáticos) es capturado y modificado por la adición del hidrógeno para formar carbohidratos,  $[(CH_2O)_n]$ ; la transformación del anhídrido carbónico en un compuesto orgánico se conoce como fijación del carbono, la energía para que se produzca proviene de la primera fase de la fotosíntesis. Los sistemas vivientes no pueden utilizar directamente la energía de la luz, pero pueden a través de una complicada serie de reacciones convertirla en enlaces C-C, esta energía puede ser luego liberada por la glicólisis y otros procesos metabólicos.

Los fotosistemas son los conjuntos de moléculas de clorofila y otros pigmentos empaquetados en los tilacoides. En el "corazón" del fotosistema se encuentra la clorofila que absorbe la luz para convertirse en una forma de energía "activada"; la energía contenida en esta clorofila activada se utiliza para hacer funcionar la maquinaria química de la cual depende gran parte de la vida.

Muchos organismos procariotas tienen un solo fotosistema: El fotosistema II ( fue el primero en la evolución, y el segundo en descubrirse). Los eucariotas usan el fotosistema II más que el fotosistema I.

El fotosistema I usa la clorofila a en una forma denominada P700, mientras que el Fotosistema II usa una forma de clorofila conocida como P680, ambas formas "activas" de la clorofila a funcionan en la fotosíntesis debido a su relación con las proteínas de la membrana tilacoide.

La fotofosforilación es el proceso de conversión de la energía del electrón excitado por la luz, en un enlace pirofosfato de una molécula de ADP; esto ocurre cuando los electrones del agua son excitados por la luz en presencia de P680. La transferencia de energía es similar al transporte quimiosmótico de electrones que ocurren en la mitocondria; la energía de la luz causa la eliminación de un electrón de una molécula de P680 que es parte del Fotosistema II. El electrón es transferido a una molécula aceptora (aceptor primario), y pasa luego cuesta abajo al Fotosistema I a través de una cadena

transportadora de electrones. La P680 requiere un electrón que es tomado del agua rompiéndola en iones  $H^+$  y  $O^{-2}$ , los iones  $O^{-2}$ , se combinan para formar  $O_2$  que se libera a la atmósfera. La luz actúa sobre la molécula de P700 del Fotosistema I, ocasionando que un electrón sea elevado a un potencial mas alto; este electrón es aceptado por un aceptor primario (diferente del asociado al Fotosistema II). El electrón pasa nuevamente por una serie de reacciones redox, y finalmente se combina con  $NADP^+$  e  $H^+$  para formar NADPH, un portador de H necesario en la fase independiente de la luz.

El electrón del fotosistema II reemplaza al electrón excitado de la molécula P700, existe por lo tanto un continuo flujo de electrones desde el agua al NADPH, los cuales son usados para la facilitación del carbono; el flujo cíclico de electrones ocurre en algunos eucariotas y en bacterias fotosintéticas, no se produce NADPH solo ATP. Esto también ocurre cuando la célula requiere ATP adicional o cuando no hay  $NADP^+$  para reducirlo a NADPH. En el Fotosistema II, el "bombeo" de iones H dentro de los tilacoides y la conversión de  $ADP + P$  en ATP es motorizado por un gradiente de electrones establecido en la membrana tilacoidea. La fotofosforilación es un proceso que ocurre en la membrana del tilacoide y esta asociado a la síntesis quimiosmótica del ATP, similar al de la mitocondria. (Figura 4.11).

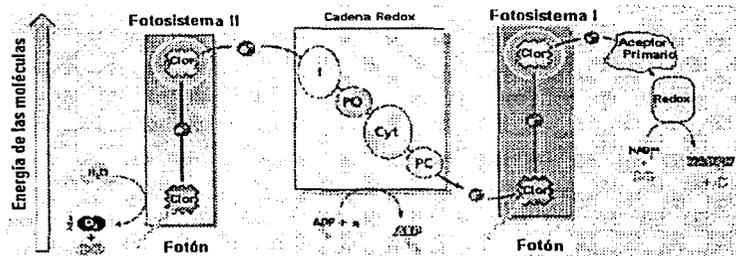


Figura 4.11 El diagrama muestra una representación de la fotofosforilación.

Las halobacterias y arqueobacterias que se desarrollan en concentraciones salinas extremas, son aeróbicos facultativos que pueden desarrollarse cuando el oxígeno esta ausente o existe en bajas proporciones. Un pigmento púrpura

conocido como retinal (también se lo encuentra en el ojo humano), actúa de manera similar a la clorofila; el complejo de retinal y las proteínas de la membrana se conoce como bacteriorodopsina (figura 4.12). El mismo genera electrones que establecen un gradiente de protones que motoriza una bomba ADP-ATP, generando ATP con la luz solar sin clorofila; esto sostiene la idea que el proceso quimiosmótico es una forma universal de fabricar ATP.

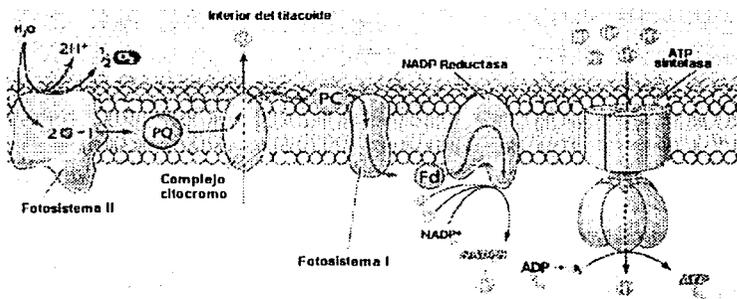


Figura 4.12 Representación de la acción de las halobacterias y arqueobacterias.

#### 4.3.2 Reacciones independientes de la luz

Las reacciones que fijan carbono son también conocidas como reacciones "oscuras" o reacciones "independientes de la luz". Las plantas terrestres deben protegerse de la desecación y han desarrollado aberturas especiales denominadas estomas que regulan la entrada y salida del gas por las hojas.

A fines de la segunda guerra mundial, en los laboratorios de Berkeley (California), Melvin Calvin y sus colaboradores, usando Carbono-14 (del cual disponía en abundancia) y las entonces nuevas técnicas de intercambio iónico, cromatografía en papel y radioautografía "mapearon" completamente el ciclo del Carbono en la fotosíntesis; por estos trabajos resultó laureado con el premio Nobel en 1961, por lo que el ciclo del carbono se conoce comúnmente como ciclo de Calvin, o de Calvin-Benson.

En el Ciclo de Calvin (o de los tres carbonos) se desarrolla en estroma de los cloroplastos, el anhídrido carbónico es fijado en la molécula ribulosa 1,5

bifosfato (RuBP); la RuBP tiene 5 carbonos en su molécula. Seis moléculas de anhídrido carbónico entran en el Ciclo de Calvin y eventualmente producen una molécula de glucosa, el primer producto estable del ciclo es el ácido 3-fosfoglicérico (PGA), como se muestra en la 4.13. Globalmente 6 moléculas de RuBP (ribulosa bifosfato) se combinan con 6 de anhídrido carbónico y dan 12 de 3-fosfoglicérico, la enzima que cataliza esta reacción es la RuBP carboxilasa (la *rubisco*), posiblemente la proteína mas abundante del mundo y se encuentra en la superficie de las membranas tilacoideas.

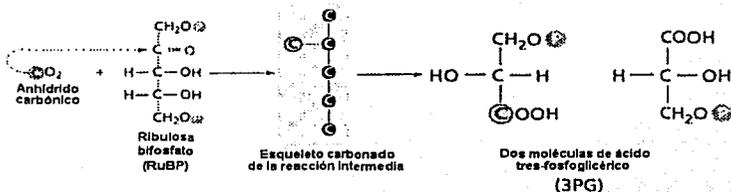


Figura 4.13 El primer producto estable del ciclo es el ácido tres-fosfoglicérico.

La energía del ATP y el NADPH generados por los fotosistemas se usan para "pegar" fosfatos (fosforilar) al 3-PGA y reducirlo a fosfogliceraldehido o PGAL, también de tres carbonos.

Del total de doce moléculas transformadas, dos moléculas de 3-PGAL salen del ciclo para convertirse en glucosa, las moléculas restantes de PGAL son convertidas por medio del ATP en seis moléculas de RuBP (cinco carbonos), que reinician el ciclo.

Por la complejidad de los seres vivos, al igual que en el ciclo de Krebs cada reacción es catalizada por una enzima específica.

#### 4.3.3 Protección de las plantas contra el sol.

El proceso fotosintético es más eficiente con niveles promedio de luz solar; a pleno sol de mediodía, las plantas absorben mucha más energía de la que pueden usar. Si no encuentra una forma de dispersar dicha energía de una manera segura, la clorofila pasa a un estado hiperexcitado, desde el cual su

energía puede transferirse al oxígeno dando como resultado "oxígeno singulet"; un potente oxidante, que puede causar daño indiscriminado a la planta e inclusive su muerte. Entre los mecanismos antioxidantes para protección de las plantas se encuentran los carotenoides que son capaces de detoxificar a la planta del "oxígeno singulet" capturando su energía y disipándola en forma de calor. Es una atenuación no fotoquímica de la energía solar, proceso en el cual interviene una proteína que se encuentra asociada al fotosistema II conocida por las siglas PsbS.

#### **4.3.4 Evolución de la biosfera.**

La biosfera se relaciona estrechamente con la hidrosfera, con la zona más superficial de la litosfera y con la parte inferior de la troposfera; en conjunto abarcan desde unos 50 km de altitud en la atmósfera, hasta los fondos de los océanos más profundos. En la biosfera la vida depende de la circulación de nutrientes esenciales, calor y energía solar.

La Tierra que alberga la biosfera presentando una superficie irregular. El máximo desnivel es de 20 km. y se ubica entre el monte Everest (8,848 m) el más alto del planeta y la fosa marina de las Marianas superior a 11,000 m de profundidad. En su mayoría está cubierta de agua salada y tan sólo una cuarta parte de su superficie queda por encima del nivel medio del mar.

Todo el planeta está envuelto por una capa gaseosa, la atmósfera, que se extiende hasta unos 300 km de altura, aunque sólo hasta la estratosfera (50 km de altura) se mantiene la influencia sobre los seres vivos. Los fenómenos meteorológicos tienen lugar en su mayoría en la troposfera (hasta 10 Km de altura).

El medio en que se desarrolla la vida, la biosfera, consta pues de troposfera, hidrosfera (mares, océanos y aguas continentales), y la parte más externa de la corteza terrestre (litosfera). En la biosfera existe vida en todas las áreas emergidas, y hasta unos pocos metros de profundidad del suelo.

En el mar, la mayor parte de los organismos acuáticos se encuentran en abundancia en profundidades inferiores a 200 m, pero es evidente que la vida se extiende incluso hasta las grandes fosas marinas, como resulta de la observación de peces y moluscos a 6.000 m de profundidad.

En todos los niveles de evolución, las plantas son las primeras que invadieron los nuevos sistemas ecológicos y posteriormente fueron seguidas por los animales. Durante el Paleozoico Temprano, las algas dominaron la biosfera, en ese tiempo solamente existieron cantidades pequeñas de invertebrados marinos en comparación con la biomasa de las plantas. El exceso en la productividad de las plantas inferiores de este tipo está presente por las lutitas marinas oscuras o negras, ricas en materia orgánica, que constituyen los sedimentos marinos del Cámbrico, Ordovícico y Silúrico.

En periodos posteriores, lutitas similares fueron menos comunes en los medios marinos y su presencia quedó limitada a situaciones paleogeográficas especiales. En el medio marino después del Silúrico, se desarrolló cierto equilibrio entre la producción de plantas y la fauna consumidora de plantas; de este modo se terminó con el exceso en la productividad de las plantas (principalmente algas). El nivel de evolución total de la flora y fauna marina del Silúrico Tardío no parece ser muy diferente del nivel de evolución marino actual. Con la conquista de los continentes por parte de las plantas terrestres durante el Silúrico y el Devónico, el predominio de la productividad orgánica marina comenzó a desaparecer lentamente hasta que se alcanzó el equilibrio entre la productividad marina y terrestre, durante el tiempo del Cretácico. Después del Silúrico, el exceso en la productividad se desplazó del medio marino abierto a las áreas costeras y a las cuencas parálicas donde se han encontrado la mayor parte de los depósitos de carbón mineral del Paleozoico Tardío. Con el advenimiento de las gimnospermas, de gran capacidad de adaptación y proliferación durante el Cretácico Temprano, el exceso de productividad de las plantas se desplazó hacia las áreas continentales. Grandes depósitos de carbón del Cretácico y del Paleógeno que se originaron en cuencas tierra adentro atestiguan este desplazamiento.

#### **4.3.5 Evolución de los organismos.**

La materia orgánica fósil en las rocas está compuesta fundamentalmente por el fitoplancton y el zooplancton marino, al igual que por materia vegetal y animal; todo lo cual se depositó en el pasado en el fondo de los grandes lagos y el lecho de las cuencas marinas. Junto a esa materia orgánica se depositaron

secuencias de arenas, limos y otros sedimentos que arrastran los ríos y el viento; lo cual conformó después de la litificación secuencias sedimentarias es decir, formaciones hechas de sedimentos. Entre estas secuencias sedimentarias se llevó a cabo el fenómeno natural que dio lugar a la creación del petróleo y gas. El proceso de sedimentación y transformación es algo que ocurrió a lo largo de miles de millones de años.

Durante el Silúrico aparece de forma abundante plantas superiores en los sedimentos; mientras que desde el Devónico constituyen secuencias con mayor contenido de materia orgánica. Los precursores de las plantas superiores se desarrollaron durante el Precámbrico, Cámbrico y Ordovícico. Estos precursores incluyen las algas verdiazules, algas verdes y finalmente las algas superiores, tales como el alga marina y las grandes algas; estas vivieron en medios ambientes marinos. La evolución acelerada de las plantas terrestres se inició en el Silúrico.

El registro de esporas sugiere un pequeño número de plantas terrestres en el Silúrico con una diversidad continuamente creciente a través del Devónico. De acuerdo con el registro de microfósiles, no fue sino hasta fines del Silúrico en que las primitivas Psilópsidas, (*Cooksonia*), pertenecientes a la división de Pteridofitas, conquistaron los continentes. Algunas Psilópsidas también vivieron en el medio marino, estas plantas primitivas posiblemente no tuvieron hojas ni raíces, pero disponían de un sistema vascular.

Durante el Devónico temprano se desarrollaron otros grupos de Pteridofitas, en el Devónico Medio, debido posiblemente a una evolución explosiva, la mayoría de las clases de plantas vasculares ya habían aparecido como representantes primitivas.

En el Devónico Tardío, las Psilópsidas se volvieron escasas, mientras que otras Pteridofitas, tales como las Licópsidas (*Cyclostigma*), Esfenópsidas (*Sphenophyllum*) y los helechos primitivos (*Pterpsida*), dominaron la flora de tierra.

Contrariamente a las plantas continentales del Silúrico, las plantas del Devónico Tardío tuvieron hojas pequeñas, raíces y madera secundaria. La flora continental del Devónico Tardío es en muchos aspectos similares a la flora del Carbonífero Temprano. Durante este último, aparecieron las primeras

Equisetales y los helechos de semilla (Pteridospermas), el Lepidodendron se convirtió en una planta común.

Durante el Carbonífero Tardío, este tipo de flora continental alcanzó una culminación en cuanto a variedad de formas y cantidad. Los arbustos y árboles de mayor tamaño se volvieron más y más abundantes durante el Devónico Tardío y el Carbonífero, formando eventualmente densos bosques y consecuentemente grandes masas de madera, ahora fijadas en extensas vetas de carbón.

Hacia fines del Paleozoico, durante el Pérmico, las gimnospermas, una nueva división de plantas, surgieron y se desarrollaron, estas incluyen principalmente clases tales como Coníferas, Ginkgoales, Cicadales, y Bebetítales; dominaron la flora hasta el Cretácico. Debido a esta predominancia de gimnospermas, el periodo de tiempo entre el Pérmico Tardío y el Cretácico temprano se denomina la "era de las gimnospermas". Las Pteridofitas no son de importancia durante este periodo. Un último punto decisivo importante en la evolución de las plantas se alcanzó durante el Cretácico Temprano.

El carácter de la vegetación continental se alteró notablemente debido a la aparición repentina de las angiospermas, las cuales dominaron rápidamente la flora.

Aún cuando la vegetación actual muestra una variedad más amplia de angiospermas que durante el Cretácico Superior, el mismo tipo de plantas aún cubre amplias áreas de los continentes.

En la figura 4.14 se muestra los principales grupos de microfósiles en el medio no marino (después de Moore, 1969); los microfósiles ricos en materia orgánica se muestran en color negro, mientras que las formas donde predomina el material esquelético inorgánico están punteadas. La aparición de un cierto grupo se representa por un área más amplia. No se ha hecho ningún intento para mostrar la abundancia relativa.

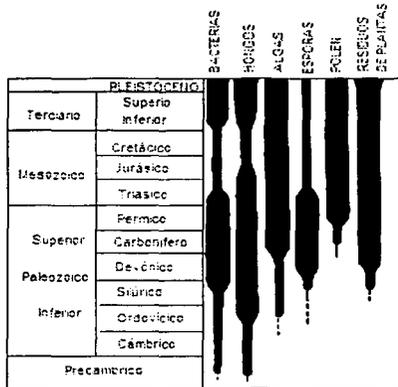


Figura 4.14 Principales grupos de microfósiles en el medio no marino (después de Moore, 1969).

En relación con el fitoplancton y las bacterias, las plantas superiores son el tercer contribuyente en importancia en cuanto a materia orgánica en sedimentos. Como se observa en la figura 4.15, durante el Silúrico Tardío, las primeras plantas superiores, las psilofitas, emergieron del medio marino y conquistaron los continentes.

**4.3.6 Productores primarios de materia orgánica.**

En los ambientes terrestres, los productores primarios están representados por individuos multicelulares de gran tamaño (las plantas) que viven largos períodos y que se encuentran fijos al sustrato, por el contrario, en los océanos los productores primarios son en su mayoría microscópica y tienen un corto período de vida. Estos productores primarios microscópicos son reconocidos como Fitoplancton (Phyto = Planta; Plankton = sin nado activo).

En el fitoplancton predominan dos grupos: las diatomeas, caracterizadas por estar encerradas en una especie de cápsula que carece de algún medio visible de locomoción y los dinoflagelados, reconocidos por la presencia de un flagelo o cola que les confiere cierta movilidad.

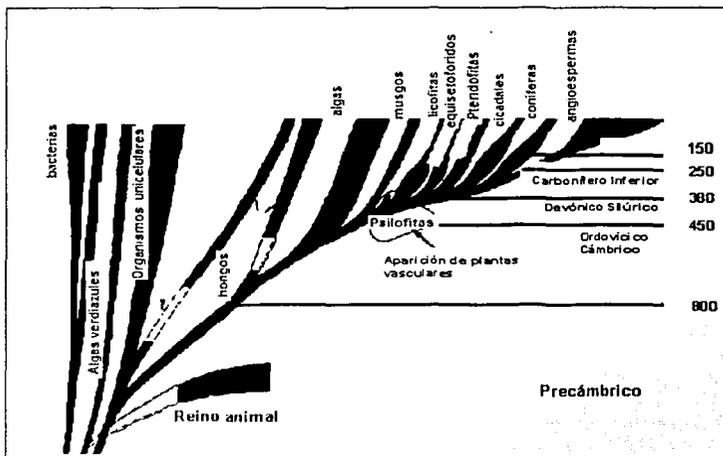


Figura 4.15 Evolución de las plantas vasculares terrestres.

Los principales grupos son las diatomeas dinoflageladas, cianofíceas (algas verdiazules) y pequeños fitoflagelados desnudos o células no móviles que corresponden con el nanoplancton; generalmente varían en tamaños desde 0.002mm hasta 1mm, y pueden formar colonias hasta de 5mm de diámetro. El nanoplancton y el ultraplancton consisten en especies que miden 10 micras o menos (Krey, 1970). Con relación a la forma en figura 4.16 se observan los principales organismos microplanctónicos, los más importantes son:

- I. Dinoflagelados: 1 *Prorocentrum micans*, 2 *Dynophysis acuta*, 3 *Pridinium divergens*, 4 *Ceratium frutripes* var. atlántica, 6 *Ceratium fusus*.
- II. Silicoflagelados: 7 *Distephanus speculum*.
- III. Diatomeas: 8 *Coscinodiscus concinnus*, 9 *Rhizosolenia faerosensis*, 10 *Rhizosolenia setigera*, 11 *Chaetoceras decipiens*, 12 *Biddulphia mobilensis*, 13 *Ditylum Brightwellii*, 14 *Nischia Closterium*.
- IV. Protozoarios: 15 *Tintinopsis campanula*, 16 *Tintinnopsis campanula*, 16 *Tintinnopsis subulata*.
- V. Cirrípedos: 17, *Nauplius* var. *Verruca* Stroma.
- VI. Copépodos: 18, *Temora longicornis*.

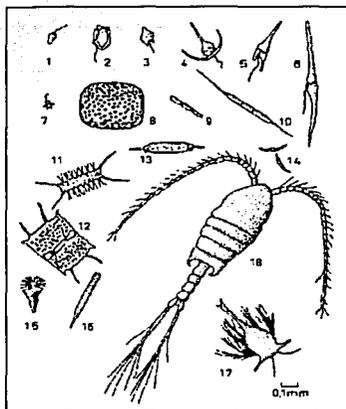


Figura 4.16 Ejemplos de organismos fitoplanctónicos y zooplanctónicos más importantes que se encuentran actualmente en los océanos.

Los organismos bentónicos, tales como las algas marinas, la hierba se encuentran por definición pegados al fondo; están limitados a áreas de agua somera que por lo general no excede de 50m. Los fitobentos pueden ser de gran importancia local, aunque a escala mundial prácticamente pueden ignorarse. Se estima que la producción anual aproximada es de  $550 \times 10^9$ t de fitoplancton y  $0.2 \times 10^9$ t de fitobentos en el océano (Krey, 1970). Aún cuando existe controversia, las bacterias se consideran de importancia junto con el fitoplancton; son parte de la biomasa del medio marino. Sin embargo, la producción total de bacterias heterotróficas debe ser menor que la producción de fitoplancton ya que la cantidad de organismos consumidores de materia orgánica no puede exceder el nivel de la producción primaria. Excepciones a esto son aquellos casos donde se dispone de otras fuentes alimenticias para las bacterias, tales como la materia orgánica disuelta y particulada que se deriva de los continentes. La intervención de las bacterias en la productividad biológica consiste en descomponer la materia orgánica y convertir los productos de esta descomposición en formas adecuadas para su asimilación

por parte de las plantas acuáticas; las bacterias sirven como alimento para muchas especies acuáticas. Las bacterias en el océano están suspendidas parcialmente en el agua y en parte se pegan en los organismos del plancton y los detritos. También existen grandes cantidades de bacterias en el piso oceánico marino, y en menor cantidad en aguas de gran profundidad.

El fitoplancton, el productor primario de materia orgánica, forma el miembro básico de la cadena alimenticia y, consecuentemente, de la pirámide de la vida. Las diatomeas, dinoflagelados y cocolitóforos son los principales productores en este orden.

Como consecuencia del predominio microscópico de los productores primarios, los herbívoros marinos también son en su mayoría animales muy pequeños, donde predominan los copépodos, crustáceos microscópicos que suman mas de 10,000 especies en los océanos; junto con los eufasiáceos y las larvas de otros invertebrados (gusanos, moluscos, crustáceos, etc.) conforman el Zooplancton. Los integrantes del zooplancton y algunos pequeños peces habitan sobre el fitoplancton, y se lo comen; el fitoplancton, transfiriéndose así la energía desde los productores primarios a los herbívoros.

El siguiente nivel de transferencia de energía descansa sobre los organismos del Necton, que a diferencia del Plancton (Fito y Zooplancton) son nadadores activos capaces de moverse contra la corriente.

Los pequeños carnívoros del Necton se alimentan de los productores primarios y, a su vez, son depredados por otros carnívoros de mayor tamaño; iniciando así una cadena donde la energía se va transfiriendo de las presas a los depredadores, y en cuya cima se encuentran los grandes depredadores o depredadores tope como los tiburones, barracudas, peces espada, atunes, focas, delfines, etc. En la zona afótica (sin luz) de los océanos, que se inicia a partir de los 200 m de profundidad, no hay posibilidad de la fotosíntesis típica, por lo cual allí los organismos dependen de otras fuentes de energía y de materia orgánica necesaria para la vida.

- La primera fuente de alimentación de esta zona proviene de la «lluvia» de desechos o restos orgánicos provenientes de organismos que han muerto o han sido depredados en las capas de aguas más superficiales.
- Otra fuente de materia orgánica proviene de algunos organismos que

migran verticalmente entre la zona fótica y la afótica.

- En la zona bentónica litoral, que comprende los fondos marinos poco profundos cercanos a la costa, además del aporte de energía de los productores primarios representados en el fitoplancton, existen otras fuentes de materia orgánica de gran valor.

El desarrollo de lechos de algas macroscópicas, hierbas marinas, arrecifes de coral, manglares que crecen cercanos a la costa y el drenaje proveniente de los ríos que desembocan en la costa, son importantes fuentes de materia orgánica que sustenta a las comunidades de organismos que habitan en la plataforma continental cercana a la costa.

En la parte profunda de la zona bentónica el aporte de materia orgánica proviene de la «lluvia» de materia orgánica de las capas superficiales y de los productos del proceso de quimiosíntesis que realizan algunas bacterias, proceso que se representa en el esquema de la figura 4.17.

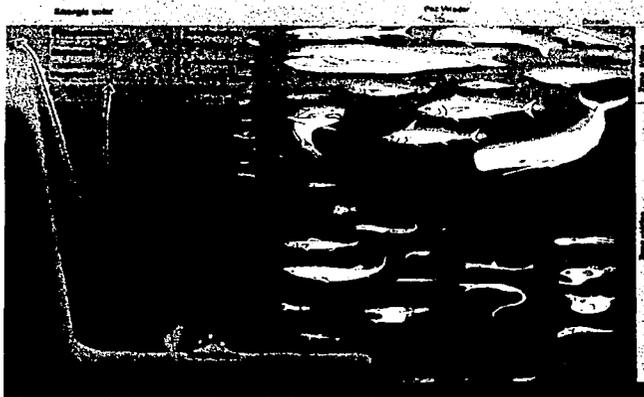


Figura 4.17 Se representan a los principales organismos productores de materia orgánica en el océano; la ubicación del zooplancton y el fitoplancton, así como las zona fótica y afótica.

#### 4.3.7 Biomasa.

La biomasa se define desde el punto de vista energético como "toda la materia

orgánica que existe en la naturaleza (árboles, arbustos, algas marinas, desechos agrícolas, animales, estiércol, etc.) que sea susceptible de transformarse en energía”.

#### **Clasificación de la biomasa**

La biomasa puede clasificarse en biomasa primaria, secundaria y terciaria, sus principales características son:

- Biomasa primaria: es la que se produce para fines determinados, como por consumo humano o industrial, incluye producción agrícola y forestal, por ejemplo: maíz, trigo, avena, sorgo, frijol de soya, caña de azúcar, madera y cebada.
- Biomasa secundaria: está compuesta por residuos obtenidos en la elaboración de productos a partir de la biomasa primaria y tiene menor valor económico.
- Biomasa terciaria: es producida en menores cantidades y se considera material de desperdicio (basura).

Actualmente es posible utilizar la biomasa secundaria y terciaria como sustrato para la obtención de energéticos y otros productos; se aprovechan mejor los residuos orgánicos que se derivan directa e indirectamente del sector agropecuario y forestal.

#### **4.4 Componentes químicos de la materia orgánica.**

La biomasa está compuesta principalmente de materias sacaroides como jugos de frutas y melazas; materiales industriales que contienen almidón, como granos de maíz, trigo etc, raíces y tallos como patata, boniato, etc.; que por su alto valor alimenticio e industrial caen dentro de la clasificación de biomasa primaria. El análisis químico de algunos productos considerados como biomasa primaria, como la madera y la mayor parte de la biomasa secundaria y terciaria, revela que están compuestos principalmente por materiales lignocelulósicos.

Ciertas formas de biomasa contienen otros compuestos aromáticos, por ejemplo el estiércol contiene gran cantidad de proteínas. La composición de los organismos vivos comprenden principalmente carbohidratos, proteínas, lípidos y ligninas; todos ellos contienen principalmente carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O) y nitrógeno (N). De estos compuestos se genera el kerógeno que después se transforma en aceite y gas de los yacimientos.

En la composición de la Biomasa se debe de considerar que los sedimentos no contienen una verdadera imagen de las poblaciones originales de organismos que viven en la columna de agua, ya que la composición química de los organismos cambia con su incorporación a los sedimentos. En lo que se refiere a sus partes blandas, básicamente todos los organismos están formados por los mismos grupos de los siguientes constituyentes químicos; es decir, proteínas, lípidos, carbohidratos y ligninas en plantas superiores. (Tabla 4.2), a continuación se describen sus principales características.

#### **4.4.1. Carbohidratos.**

Los carbohidratos son una de las cuatro clases principales de biomoléculas, las otras tres son las proteínas, los ácidos nucleicos y los lípidos. Los carbohidratos constituyen la mayor parte de la materia orgánica de la Tierra, a causa de sus variadas funciones en todos los seres vivos. Son la fuente más abundante y barata de alimentos de la naturaleza y por tanto los más consumidos por los seres humanos (en muchos países constituyen de 50 a 80% de la dieta de la población). Los provenientes de las especies del reino vegetal son más variados y abundantes que los del reino animal. Son los principales compuestos químicos almacenadores de la energía luminosa del sol; de hecho, la glucosa sintetizada en las plantas por el proceso de fotosíntesis representa la materia prima fundamental para la fabricación de la gran mayoría de ellos; el bióxido de carbono reacciona con agua para formar glucosa, con el consecuente desprendimiento de oxígeno. A su vez, mediante diversas rutas bioquímicas, el azúcar da origen a muchos otros compuestos como la sacarosa y la fructosa, o bien a polímeros como la celulosa y el almidón. La mayoría de los compuestos orgánicos que se encuentran en las plantas y en los animales son derivados de hidratos de carbono; la misma síntesis de proteínas se lleva a cabo con los aminoácidos provenientes de la reacción entre hidratos de carbono y diversas sustancias nitrogenadas. Los azúcares simples no se suelen encontrar libres en la naturaleza, sino integrando polisacáridos, los que a su vez forman parte de la estructura firme del producto, en cuyo caso no son digeribles; también funcionan como reserva energética.

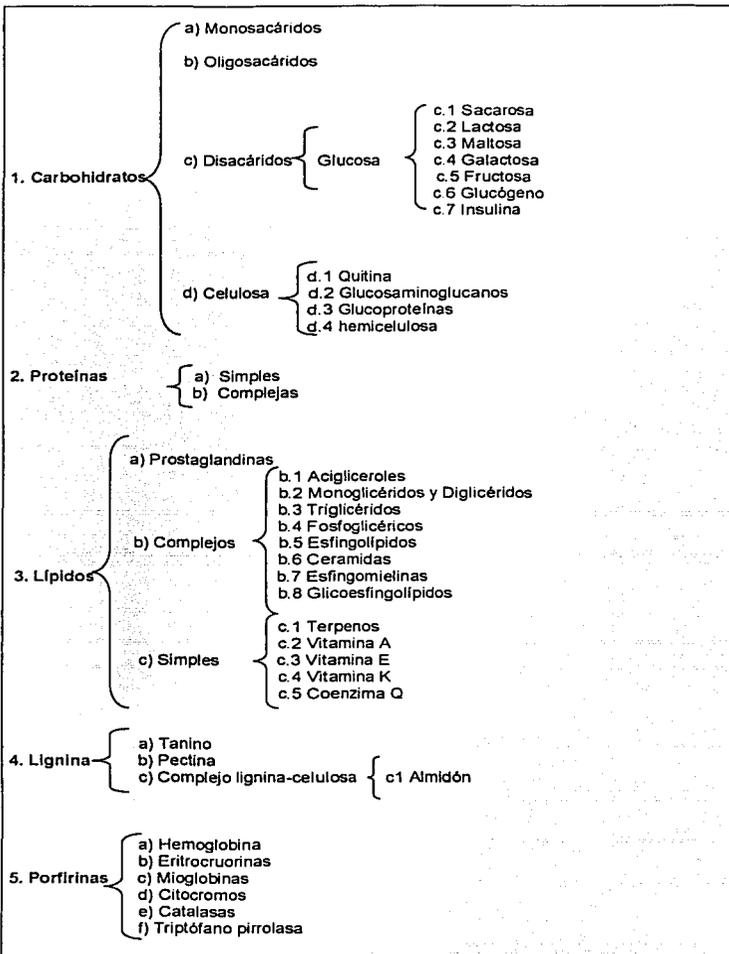


Tabla 4.2 Principales componentes químicos de la Biomasa.

Las funciones biológicas más importantes de los carbohidratos son:

- Las enormes cantidades de almidón y de otros carbohidratos que se producen por fotosíntesis constituyen las fuentes últimas de energía y de carbono de las células no fotosintéticas de los animales y del mundo microbiano.
- Los carbohidratos en forma de azúcar o de almidón, representan una parte principal del consumo calórico total de los humanos y de la mayor parte de las formas de vida animal; como también de muchos microorganismos.
- El almidón y el glucógeno actúan como reserva temporal de glucosa en el combustible primordial para generar energía.
- El ATP, la unidad biológica de energía libre es un derivado de azúcar fosforilado, como también lo son muchas coenzimas.
- Los azúcares de ribosa y desoxirribosa forman parte de la trama estructural del RNA y el DNA. La flexibilidad conformacional de los anillos de estos azúcares es importante en el almacenamiento y expresión genética.
- Los carbohidratos polímeros insolubles desempeñan el papel de elementos estructurales y de soporte en las paredes celulares de las bacterias y de las plantas, en los tejidos conectivos y en las cubiertas celulares de animales.
- Otros carbohidratos actúan como lubricantes de las articulaciones del esqueleto, como adhesivos entre las células y para conferir especificidad biológica sobre la superficie de las células animales.

Los carbohidratos se pueden estudiar y dividir de la siguiente manera:

**a) Monosacáridos.** La palabra "sacárido" se deriva de un vocablo griego que significa azúcar, son azúcares simples. Los monosacáridos están constituidos por una sola unidad de polihidroxi aldehído o cetona. El monosacárido más abundante en la naturaleza es la D-glucosa, azúcar de 6 carbonos.

\*Las moléculas que se clasifican como carbohidratos son polihidroxi aldehídos y polihidroxi cetonas, o sustancias que los producen mediante una hidrólisis simple. Los carbohidratos que no pueden hidrolizarse a moléculas más simples, se denominan monosacáridos o azúcares simples.

Los monosacáridos son sólidos incoloros, cristalinos, muy solubles en el agua pero insolubles en disolventes no polares; la mayor parte tienen sabor dulce.

Los monosacáridos corrientes tienen la fórmula empírica ( $\text{CH}_2\text{O}$ ), en donde

$n=3$  o número mayor. El esqueleto de los monosacáridos corresponden con una cadena carbonada sencilla, con los carbonos unidos por enlace simple y que no posee ramificaciones. Uno de los átomos de carbono está unido por enlace doble a un átomo de oxígeno para formar un grupo carbonilo, cada uno de los demás átomos de carbono poseen un grupo hidroxilo.

Las familias de Monosacáridos son las Aldosas y las Cetosas, si el grupo carboxilo se halla al extremo de la cadena carbonada, el monosacárido es un aldehído y se llama aldosa; si el grupo carboxilo se halla en cualquier otra posición, el monosacárido es una cetona y se llama cetosa.

Los monosacáridos que poseen 4, 5, 6, y 7 átomos de carbono en sus esqueletos reciben respectivamente, el nombre de tetosas, pentosas, hexosas y heptosas. Cada una de ellas existe en dos series: aldosterosas y cetosas, aldopentosas y cetopentosas, y así sucesivamente. Las hexosas, entre las que se halla la aldohexosa, D-glucosa, y la cetohexosa, D-fructosa, son los monosacáridos más abundantes en la naturaleza; las aldopentosas D-ribosa, 2-desoxi-D-ribosa son componentes de los ácidos nucleicos.

**b) Oligosacáridos.** Del griego, oligos "pocos", están constituidos por cadenas cortas de unidades de monosacáridos, unidas mediante enlaces covalentes; los más abundantes de estos son los disacáridos que poseen dos unidades de monosacáridos. Es típica la sacarosa o azúcar de caña, constituida por los azúcares de 6-carbonos, D-glucosa y D-fructosa, unidos por enlace covalente. La mayor parte de los oligosacáridos que poseen tres o más unidades no se hallan en forma libre sino que se hallan unidos como cadenas laterales a polipéptidos en las glucoproteínas y en los proteoglicanos.

**c) Disacáridos.** Los disacáridos son también abundantes en la naturaleza, están constituidos por dos monosacáridos unidos entre sí por covalencia. En la mayor parte de los disacáridos el enlace químico que liga a las dos unidades de monosacáridos se denomina enlace glucosídico y se forma cuando un grupo hidroxilo de uno de los azúcares reacciona con el carbono del segundo azúcar. Los enlaces glucosídicos se hidrolizan con facilidad por los ácidos, pero resisten a la acción hidrolítica de las bases. Así, los disacáridos pueden

hidrolizarse para dar sus componentes monosacáridos libres por ebullición con ácido diluido. (Tabla 4.3); sus características son importantes las cuales se describen a continuación:

Los Disacáridos más comunes son:	Sacarosa	→	(azúcar de mesa, se obtiene de la caña o la remolacha).
	Lactosa	→	(El disacárido de la Leche)
	Maltosa	→	(Procedente de la Hidrólisis del almidón)

Tabla 4.3 Características de los tres disacáridos más comunes.

**c.1 Sacarosa:** Azúcar constituido por glucosa y fructosa, lo forman muchas plantas pero no aparece en los animales superiores. En contraste con la maltosa y la lactosa, la sacarosa no contiene ningún átomo de carbono anomérico libre, ya que los carbonos anoméricos de sus dos unidades monosacáridas constituyentes se hallan unidas entre sí; por esta razón la sacarosa no es un azúcar reductor.

Los animales no pueden absorber sacarosa comotal, pero pueden disponer de ella por la intervención de enzima sacarosa, también llamado invertasa, que se hallan en las células que recubren el intestino delgado y que hidrolizan la sacarosa a D-glucosa y D-fructosa, que son fácilmente absorbidos y pasan a la sangre.

La sacarosa es, en ventaja, él más dulce de los disacáridos comunes, es también más edulcorante que la glucosa. Se ha desarrollado recientemente un nuevo proceso industrial para manufacturar un edulcorante más dulce a partir de la D-glucosa. En este proceso, se hidroliza primero el almidón para obtener D- glucosa en forma de jarabe de maíz, disolución neutra concentrada de D- glucosa; se deja fluir por una columna grande rellena de un material de soporte inerte, al que se ha unido por enlace covalente el enzima glucosa isomerasa, de diferentes procedencias vegetales. El enzima inmovilizado sobre el soporte inerte, cataliza la reacción reversible:



Originando una mezcla equimolar de estos 2 monosacáridos, como la D-fructosa posee, un poder edulcorante 2.5 veces superior que la D-glucosa, el poder edulcorante del jarabe de malz aumenta mucho. Este nuevo producto se emplea profusamente en la producción de alimentos, refrescos y helados.

Recientemente se ha puesto en el mercado un nuevo producto, la fructosa, con 90% de pureza, obtenido también por el procedimiento de la isomerasa, para emplearlo como edulcorante de mesa, pero su precio es de aproximadamente doble que el de la sacarosa, por unidad de peso.

Los edulcorantes artificiales que no poseen ningún valor como alimentos, se han desarrollado para pacientes obesos o diabéticos, para quienes el exceso de consumo de azúcar es dañino. Los edulcorantes artificiales estimulan las mismas papilas gustativas de la lengua que son estimuladas por los azúcares, pero no son empleados como alimentos para el organismo.

**c.2 Lactosa.** El disacárido lactosa que rinde D-galactosa y D-glucosa por hidrólisis, aparece solamente en la leche; posee un grupo carbonilo libre que actúa potencialmente sobre el residuo de glucosa; la lactosa es un disacárido reductor. Durante la digestión, la lactosa experimenta hidrólisis enzimática por la lactasa de las células de la mucosa intestinal. La lactosa no puede ser absorbida del intestino a la corriente sanguínea a menos que haya experimentado primero la hidrólisis en sus unidades monosacáridas, la lactosa permanece sin ser absorbida en el tracto intestinal de los individuos intolerantes a la lactosa, provocando diarrea y flujo intestinal anormal.

**c.3 Maltosa.** Contiene dos residuos de D-glucosa, unidos por enlace glucosídico entre el átomo de carbono 1 (el carbono anomérico) del primer residuo de glucosa y el átomo de carbono 4 de la segunda glucosa: los residuos de glucosa de la maltosa se hallan en forma de piranosa. La maltosa es un azúcar reductor ya que posee un grupo carbonilo libre, potencialmente que puede oxidarse. El segundo residuo de la glucosa de la maltosa es capaz de existir en formas alfa y Beta. La forma alfa se origina por la acción del

enzima amilasa salivar sobre el almidón. La maltasa se hidroliza, rindiendo dos moléculas de D-glucosa por la maltasa, enzima intestinal, que es específico para el enlace alfa (1 → 4). El disacárido celobiosa contiene, también dos residuos de D-glucosa, pero se hallan unidos por enlace beta (1 → 4).

### **Glucosa.**

Es el denominado "azúcar de uva", llamado así por encontrarse en gran abundancia de dicho fruto; es el monosacárido más común hallándose normalmente en todos los vegetales y animales. La glucosa es una molécula no ionizada de 6 átomos de carbono, por tanto es una hexosa. Es el monosacárido más abundante en la naturaleza. Como en su metabolismo no libera iones de hidrógeno no provoca acidosis, aun con concentraciones en sangre muy elevadas. La glucosa es el hidrato de carbono más elemental y esencial para la vida, es el componente inicial o el resultado de las principales rutas del metabolismo de los glúcidos; es también producto de la fotosíntesis que hacen los vegetales de hoja verde gracias a su clorofila.

La glucosa se transforma luego en almidón en los cereales y hortalizas, o en fructosa en las frutas y la miel. ambos se vuelven a transformar en glucosa en nuestro organismo y así es como se absorbe.

Cuando la glucosa que llega a las células es degradada en un proceso denominado glucólisis, con ayuda del oxígeno, cuya principal función es la de combustionar la glucosa se obtiene como producto de este proceso se reconvierte en agua (que eliminamos o reutilizamos) y anhídrido carbónico (que exhalamos por medio de la respiración). Este es el modo principal de obtener energía para realizar todas las actividades que la requieran, cuando falta este glúcido, las proteínas esenciales se metabolizan para convertirse en energía y evitar daños irreparables los siguientes dos tipos de absorción:

Los hidratos de carbono de nuestra dieta, sólo se absorben en forma de monosacáridos, y en el caso de la glucosa podemos distinguir entre:

- Absorción pasiva: En el proceso de la digestión hay un momento en el que se hidrolizan los oligosacáridos y esto da lugar a una elevada concentración de glucosa, que al ser superior a la de la célula, pasa a través de la membrana sin necesidad de energía. Sin embargo, a diferencia de las

pentosas, requiere un transportador específico de la misma, y se mantiene mientras haya esta diferencia de gradiente.

- Absorción activa: El transporte de glucosa por la membrana requiere energía metabólica, iones de sodio y una proteína transportadora; son estos iones los que provocan una diferencia de gradiente que libera energía aprovechada por la glucosa para atravesar la membrana. Luego la glucosa es transportada a los capilares sanguíneos de forma pasiva.

Posteriormente, la glucosa es metabolizada en las células intestinales; de toda la glucosa que entra, cerca del 50% se transforma en lactato, antes de pasar al torrente sanguíneo por medio de un proceso denominado glucólisis que sirve para mantener el gradiente adecuado para la absorción por transferencia pasiva. El proceso se completará en el hígado, cuando mediante el proceso llamado gluconeogénesis, el lactato se vuelve a convertir en glucosa con el aporte de energía en forma de ATP. En la glucólisis se convierte la glucosa en ácido pirúvico y en este estado se transforma a  $\text{CO}_2$  y a  $\text{H}_2\text{O}$  por medio de una oxidación. En este proceso se produce ATP.

Como se puede deducir, la glucólisis y la gluconeogénesis son procesos contrarios y no se pueden producir a la vez ya que una inhibe a la otra por medio de una serie de efectores celulares. La glucólisis es la degradación de la glucosa, comprende la degradación de los carbohidratos en los organismos vivos desde glucosa o glucógeno hasta ácido láctico en ausencia de oxígeno para el caso del músculo, y en aerobiosis hasta pirúvico en la mayoría de los tejidos.

A partir del metabolismo de la glucosa y a través de diversas vías se obtiene dióxido de carbono, agua, piruvato y lactato. Otras propiedades características del metabolismo de la glucosa cerebral son la formación de ácido  $\gamma$ -aminobutírico (GABA) y la generación de grandes depósitos de glutamato y aspartato; aparte de los cuerpos cetónicos, que normalmente sólo existen a bajos niveles en la sangre y difícilmente son utilizados. La glucosa es el sustrato que a lo largo de toda la vida, suple los requerimientos de energía del cerebro. Solamente la glucosa, la manosa o los compuestos que se convierten rápidamente a glucosa en cualquier lugar del organismo pueden recuperar a los pacientes o a los animales que sufren coma hipoglucémico. Ninguna cetona

es efectiva, probablemente debido a que la misma glucosa es necesaria para el funcionamiento del ciclo del ácido cítrico.

Existe una correlación directa entre los niveles de actividad funcional y los niveles de captación de glucosa y de fosforilación en el sistema nervioso. Esto implica que, durante la respuesta funcional, se esta llevando a cabo una modulación rápida, prolongada y efectiva del metabolismo energético, que se acompaña de incrementos equivalentes en el flujo cerebral local. Esto viene a remarcar que los requerimientos energéticos varían constantemente en lo referente a aquellos componentes que utilizan energía del sistema nervioso: los relacionados con la producción de actividad eléctrica, con el tráfico de impulsos nerviosos y con la restauración de los potenciales de membrana neuronal. Esencialmente, este uso de la energía se centra sobre la actividad de la bomba de sodio,  $\text{Na}^+\text{K}^+\text{-ATPasa}$ , que es responsable del transporte interno acoplado del  $\text{K}^+$  y del transporte externo de  $\text{Na}^+$  para mantener los potenciales de membrana en reposo y restaurar sus gradientes iónicos asociados tras la actividad eléctrica. La proporción de consumo de energía debido a este proceso clave es de aproximadamente 40%.

Cuando disminuye la actividad funcional, como ocurre en casos de anestesia por barbitúricos y en la hipotermia, se produce una disminución paralela del flujo sanguíneo cerebral y de la utilización del oxígeno cerebral. En estas situaciones, los niveles tisulares de fosfatos energéticos, ATP, ADP, AMP y fosfocreatina (PhCr) están incrementados o inalterados, mientras que los niveles de los intermediarios de los glucolíticos clave, tales como la glucosa 6-fosfato y la fructosa 6-fosfato, se incrementan considerablemente; lo cual indica la inhibición de la fosfofructoquinasa (enzima limitante del coeficiente glucolítico). Tras una identificación de este tipo en el flujo principal del metabolismo energético, existirá una disminución de la fosforilación oxidativa y un descenso general del flujo metabólico.

Los cambios relativamente pequeños de glucosa cerebral y de utilización de oxígeno que acompañan a los estados mentales alterados tales como ansiedad, estrés o estimulación sensorial, no se acompañan de alteraciones detectables de los niveles de fosfatos energéticos o de los niveles de intermediarios glucolíticos o del ciclo del ácido cítrico; incluso aunque exista un

cambio en de unas dos veces el coeficiente metabólico. En consecuencia, la tasa metabólica del cerebro puede incrementarse, pero su estado metabólico referido a los niveles de fosfatos de energía persiste relativamente inalterado.

**c.4 Galactosa.** Es un monosacárido que se obtiene en el intestino, por medio de la acción de la enzima lactasa, al actuar sobre la lactosa (que es el azúcar de la leche), en esta reacción se producen: glucosa y galactosa.

**c.5 Fructosa.** La fructosa es una cetohehexosa y uno de los monosacáridos más abundantes en la alimentación. La dieta del hombre es rica en sacarosa, compuesto que cuando es dividido por la sacarasa en el intestino, se puede observar que está formado en parte por fructosa y por otra parte de glucosa; además, la fructosa se puede encontrar en estado libre, por lo tanto, es importante conocer el metabolismo de la misma. Este glúcido se encuentra en frutas y verduras, también la miel contiene grandes cantidades de este azúcar, ya que cerca de un 40% de su sustancia seca es fructosa.

**c.6 Glucógeno.** Se trata de un polisacárido formado por moléculas de D-Glucosa unidas por enlaces  $\alpha$  (1 - 4) y  $\alpha$  (1 - 6), pero mucho más ramificado. Una rama del árbol del glucógeno se caracteriza por poseer ramificaciones cada cuatro restos glucosilo dentro del núcleo más central de la molécula. Las cadenas de glucosa en el glucógeno están mucho más ramificadas que en la amilopectina, y por supuesto que en los ácidos nucleicos y las proteínas; la importancia de que el glucógeno sea una molécula tan ramificada tiene su explicación en varias razones. La ramificación incrementa su solubilidad estructura hace que tenga un gran número de residuos terminales no reductores (que van a ser los sitios de acción de la glucógeno fosforilasa y de la glucógeno sintasa). En definitiva, las ramificaciones facilitan enormemente tanto la velocidad de síntesis como la de degradación del glucógeno.

La principal función del glucógeno, como el principal polisacárido de reserva de las células animales, es la de reservorio nutricional en los tejidos animales debido a su capacidad para almacenar glucosa de rápida movilización, ya sea en los periodos interdigestivos o mientras se produce la actividad muscular; por otra parte debido precisamente a su capacidad de almacenamiento, reduce al máximo los cambios de presión osmótica que la glucosa libre podría ocasionar en la célula. El principal polisacárido el Glucagón.

El glucagón es un polipéptido de cadena lineal que contiene 29 aminoácidos, este polipéptido, al igual que las sustancias inmunorreactivas similares a él, se forma en el intestino delgado y en el tejido cerebral. En el intestino se ha encontrado una sustancia similar al proglucagón, la glicentina. Estas sustancias presentan reacción cruzada con anticuerpos contra el glucagón y compiten con él por el receptor de glucagón en la célula hepática. La principal función del glucagón se encuentra en la formación de glucosa mediante la activación del sistema fosforilasa dependiente de cAMP del hígado, con una degradación de glucógeno a glucosa, la cual pasará a formar parte del torrente sanguíneo. Además, aumenta la gluconeogénesis hepática al incrementar el pool hepático de precursores de la glucosa; disminuye las actividades piruvato quinasa y acetil CoA carboxilasa. En la célula grasa el glucagón estimula la actividad lipasa dependiente de cAMP, que convierte triacilgliceroles en ácidos grasos libres y glicerol.

El tiempo medio de inactivación del glucagón es de 5 minutos en hígado y riñones. En gran medida, muchos de los efectos metabólicos del glucagón son opuestos a la acción de la insulina, por lo que los efectos del glucagón en el incremento de la degradación de grasas y en el incremento de la cetogénesis son más pronunciados en pacientes afectados de diabetes (déficit de insulina) y en aquellos sometidos a ayuno (caso en el que descienden los niveles de insulina). Entre los péptidos relacionados estructuralmente con el glucagón se encuentran el péptido inhibidor gástrico, la secretina y el péptido intestinal vasoactivo (VIP).

**c.7 Insulina.** La insulina es un polipéptido formado por 51 residuos de aminoácidos y fue la primera estructura primaria de proteína que se determinó (Sanger y cols., 1951) y la primera proteína sintetizada (Katsoyannis, 1961; Zanh y cols., 1964; Niu y cols., 1963). Esta sustancia se segrega en el páncreas, más concretamente en las células b en los llamados islotes de Langerhans, en forma de precursor inactivo; la proinsulina, que una vez sintetizada se transfiere en un proceso dependiente de energía al aparato de Golgi. La estructura activa está compuesta de dos cadenas unidas por dos puentes de disulfuro. Una vez que llega a el aparato de Golgi, se almacena en forma de gránulos y es liberada por medio de un proceso de emiocitosis. De la

insulina que llega al hígado, prácticamente la mitad es eliminada y la que alcanza la circulación periférica tiene una vida media de unos 20 minutos y es, posteriormente destruida por la insulinasa del hígado y del riñón.

La secreción de insulina en respuesta a la glucosa se realiza en dos pasos, en el primero se libera la hormona previamente sintetizada y, en el segundo, se debe a la conversión de precursores. La liberación de la insulina se halla bajo la acción de los estimulantes de los receptores  $\beta$ , como el isoproterenol, y es inhibida por agentes bloqueantes  $\beta$ , como el propanolol. Su liberación se inhibe por los estímulos vagales, por la adrenalina, noradrenalina, serotonina y por la 2-desoxiglucosa. La respuesta insulínica es muy elevada durante la infancia y la adolescencia, sin que existan diferencias con respecto a la tolerancia a la glucosa en los distintos grupos.

Alrededor de 1890, Mering y Minkowsky habían demostrado que la extirpación del páncreas produce en animales de laboratorio un padecimiento similar a la diabetes mellitus. Posteriormente, Banting y colaboradores, lograron extraer el principio activo del páncreas y demostraron su utilidad terapéutica tanto en perros diabéticos como en humanos; estos estudios se realizaron entre 1921 y 1922 y algún tiempo después recibió el premio Nobel de Fisiología y Medicina. En 1926 ya se contaba con insulina cristalina, y cuarenta años después Langer estableció su secuencia de aminoácidos, por el que obtuvo el premio Nobel de Química.

#### **d. Celulosa.**

La celulosa es el principal constituyente del armazón de los vegetales, no es soluble en los solventes ordinarios y consiste de unidades beta-D-glucopiranosas unidas por enlaces beta (1 $\rightarrow$ 4) para formar cadenas rectas, largas, reforzadas por enlaces cruzados de puentes de hidrógeno. La celulosa no puede ser digerida por numerosos mamíferos, incluyendo al hombre, debido a la ausencia de una hidrolasa que ataca el enlace beta; por lo tanto, es una fuente importante de "volumen" en la dieta. En el intestino de los rumiantes y otros herbívoros existen microorganismos que atacan al enlace beta, haciendo disponible a la celulosa como una fuente calórica importante.

**d.1 Quitina.** Es un importante polisacárido estructural de los invertebrados se encuentra, por ejemplo, en los exoesqueletos de los crustáceos e insectos;

químicamente, la quitina está formada por unidades de N-acetil-D-glucosamina unidas por enlaces beta (1 → 4) glucosídicos.

**d.2 Glucosaminoglucanos.** Están constituidos por cadenas de carbohidratos complejos que se caracterizan por su contenido en aminoazúcares y ácidos urónicos. Cuando estas cadenas se unen a la molécula de proteína, el compuesto se conoce como un peptidoglucano. Al igual que la sustancia fundamental o de envoltura, están relacionados con elementos estructurales de los tejidos como el hueso, la elastina y el colágeno; su propiedad de retener grandes cantidades de agua y de ocupar espacio, acojinando o lubricando otras estructuras, es auxiliada por el gran número de grupos – OH y de cargas negativas de las moléculas, las cuales por repulsión mantienen separadas a las cadenas de carbohidrato.

**d.3 Glucoproteínas.** Existen en muchas condiciones diferentes en los líquidos corporales y en los tejidos, incluyendo las membranas celulares. Son proteínas que contienen carbohidratos en diversas proporciones adheridos en forma de cadenas cortas o largas (más de 15 unidades), ramificadas o no.

**d.4 Hemicelulosa.** Constituye entre el 20 y el 40% de la biomasa: existen varios tipos de hemicelulosa, en general pueden definirse como heteropolisacáridos, de cadena corta y ramificada, fácilmente hidrolisables. Están compuestos por hexosas como D- Glucosa, D- Galactosa; por pentosas como D-Xilosa, L- Arabinosa; ácidos urónicos y otros azúcares.

Las hemicelulosas se clasifican de acuerdo al azúcar presente en la cadena polimérica, la más común es el Xilano, que es un heteropolímero de la D-Xilosa unida mediante enlaces (1 → 4) y con cadenas laterales de arabinosa y otros azúcares. Otros tipos de hemicelulosa son los mananos, glucanos, galactanos, etc.

#### **4.4.2 Proteínas.**

Las proteínas son biomoléculas formadas básicamente por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, pueden además contener azufre y en algunos tipos de proteínas, pequeñas proporciones de fósforo, hierro, magnesio y cobre entre otros elementos.

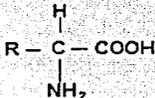
Pueden considerarse polímeros de pequeñas moléculas que reciben el nombre

de aminoácidos y son por tanto los monómeros unidad; los aminoácidos están unidos mediante enlaces peptídicos.

La unión de un bajo número de aminoácidos da lugar a un péptido; si el n. de aa. que forma la molécula no es mayor de 10 se denomina oligopéptido, si es superior a 10 se llama polipéptido y si el n. es superior a 50 aa. se denomina propiamente proteína.

### a.1 Aminoácidos.

Los aminoácidos se caracterizan por poseer un grupo carboxilo (-COOH) y un grupo amino (-NH<sub>2</sub>); las otras dos valencias del carbono se saturan con un átomo de H y con un grupo variable denominado radical R. De acuerdo a este radical se distinguen 20 tipos de aminoácidos.



En disolución acuosa los aminoácidos muestran un comportamiento anfótero, es decir pueden ionizarse dependiendo del pH, como un ácido liberando protones y quedando (-COO<sup>-</sup>), o como base; los grupos -NH<sub>2</sub> captan protones, quedan como (-NH<sub>3</sub><sup>+</sup>), o pueden aparecer como ácido y base a la vez. En este caso los aminoácidos se ionizan doblemente, apareciendo una forma dipolar iónica llamada zwitterion.

Los péptidos están formados por la unión de aminoácidos mediante un enlace peptídico; es un enlace covalente que se establece entre el grupo carboxilo de un aa. y el grupo amino del siguiente, dando lugar al desprendimiento de una molécula de agua.

Estructuras de las proteínas.

La organización de una proteína viene definida por cuatro niveles estructurales denominados estructura primaria, estructura secundaria, estructura terciaria y estructura cuaternaria; cada una de estas estructuras informa de la disposición de sus componentes de la anterior en el espacio. A continuación se describen sus características más importantes:

Estructura Primaria

La estructura primaria es la secuencia de aa. de la proteína; nos indica qué aas

componen la cadena polipeptídica y el orden en que dichos aas. Se encuentran. La función de una proteína depende de su secuencia y de la forma que ésta adopte.

#### Estructura Secundaria.

La estructura secundaria es la disposición de la secuencia de aminoácidos en el espacio, los aas., a medida que van siendo enlazados durante la síntesis de proteínas y gracias a la capacidad de giro de sus enlaces, adquieren una disposición espacial estable. Existen dos tipos de estructura secundaria:

1. la  $\alpha$ (alfa)-hélice
2. la conformación beta

La estructura secundaria se forma al enrollarse helicoidalmente sobre sí misma la estructura primaria; se debe a la formación de enlaces de hidrógeno entre el  $-C=O$  de un aminoácido y el  $-NH-$  del cuarto aminoácido que le sigue.

En esta disposición los aas. no forman una hélice sino una cadena en forma de zigzag denominada disposición en lámina plegada, presentan esta estructura la queratina de la seda o fibroína.

#### Estructura terciaria.

La estructura terciaria informa sobre la disposición de la estructura secundaria de un polipéptido al plegarse sobre sí misma originando una conformación globular. En definitiva, es la estructura primaria la que determina cuál será la secundaria y por tanto la terciaria. La conformación globular facilita la solubilidad en agua y así realizar funciones de transporte, enzimáticas, hormonales, etc. Esta conformación globular se mantiene estable gracias a la existencia de enlaces entre los radicales R de los aminoácidos:

1. El puente disulfuro entre los radicales de aminoácidos que tiene azufre.
2. Los puentes de hidrógeno.
3. Los puentes eléctricos.
4. Las interacciones hidrófobas.

#### Estructura Cuaternaria

Esta estructura corresponde con la unión, mediante enlaces débiles (no covalentes) de varias cadenas polipeptídicas con estructura terciaria, para formar un complejo proteico. Cada una de estas cadenas polipeptídicas recibe

el nombre de protómero.

El número de protómeros varía desde dos como en la hexoquinasa, cuatro como en la hemoglobina, o muchos en como la cápsida del virus de la poliomielitis, que consta de 60 unidades proteícas. Las proteínas tienen las siguientes propiedades:

1. Especificidad. La especificidad se refiere a su función; cada una lleva a cabo una determinada función y lo realiza porque posee una determinada estructura primaria y una conformación espacial propia; por lo que un cambio en la estructura de la proteína puede significar una pérdida de la función. Además, no todas las proteínas son iguales en todos los organismos, cada individuo posee proteínas específicas propias que se ponen de manifiesto en los procesos de rechazo de órganos transplantados. La semejanza entre proteínas son un grado de parentesco entre individuos, por lo que sirve para la construcción de "árboles filogenéticos"

2. Desnaturalización.

Consiste en la pérdida de la estructura terciaria, por romperse los puentes que forman dicha estructura. Todas las proteínas desnaturalizadas tienen la misma conformación son muy abiertas y con una interacción máxima con el disolvente, por lo que una proteína soluble en agua cuando se desnaturaliza se hace insoluble en agua y precipita. La desnaturalización se puede producir por cambios de temperatura (por ejemplo huevo cocido o frito ) y por variaciones del pH. En algunos casos, si las condiciones se restablecen, una proteína desnaturalizada puede volver a su anterior plegamiento o conformación, proceso que se denomina renaturalización. En la tabla 4.4 se muestra la clasificación de las proteínas y en la tabla 4.5 se indican sus funciones con algunos ejemplos.

**Clasificación de las Proteínas.****1. HOLOPROTEÍNAS.**

Formadas solamente por aminoácidos:

a) Glucobulares, Protaminas: Zeína (maiza), gliadina (trigo), hordelina (cebada); Gluteninas  
Gluteína (trigo), orizantina (arroz); Albúminas: Seroalbúmina (sangre), ovoalbúmina (huevo),  
lactoalbúmina (leche); Hormonas: Insulina, hormona del crecimiento, prolactina, tirotrópica  
Elastinas: En tendones y vasos sanguíneos; Fibroínas: En hilos de seda (arañas, insectos)

**2. HETEROPROTEÍNAS.**

Formadas por una fracción proteínica y por un grupo no proteínico, que se denomina "grupo  
prostético":

Formadas por una fracción proteínica y por grupo no proteínico, que se denomina "grupo  
prostético":

Glupoproteínas: Ribonucleasa, Mucoproteínas, Anticuerpos y Hormona luteinizante.

Lipoproteínas: De alta, baja y muy baja densidad, que transportan lípidos en la sangre.

Nucleoproteínas: Nucleosomas de cromatina Ribosomas.

Comproteínas: Hemoglobina, hemocianina, mioglobina, que transportan oxígeno Citocromos,  
que transportan electrones.

Tabla 4.4 Clasificación de las Proteínas.

**Funciones y ejemplos de proteínas.**

Estructural:

Como las glucoproteínas que forman parte de las membranas; las histonas que forman parte  
de los cromosomas; el colágeno, del tejido conjuntivo fibroso. La elastina, del tejido conjuntivo  
elástico. La queratina de la epidermis.

Enzimática:

Son las más numerosas y especializadas, actúan como biocatalizadores de las reacciones  
químicas.

Hormonal:

Insulina y glucagón, Hormona del crecimiento, Calcitonina Hormonas tropas.

Defensiva: Inmunoglobulina Trombina y fibrinógeno

Transporte: Hemoglobina, Hemocianina Citocromos

Reserva: Ovoalbúmina de la clara de huevo, Gliadina del grano de trigo y Lactoalbúmina de la  
leche.

4.5 Tabla de las funciones y ejemplos de proteínas.



de cadena larga con alcoholes grasos (monohidroxiílico) o con esteroides; son insolubles en agua, cuando se calientan son blandas y moldeables, pero en frío son duras. Forman en los organismos cubiertas protectoras de la piel, pelo y plumas, hojas y frutos de las plantas superiores y forman parte del esqueleto de muchos insectos.

**b) Complejos.** Los lípidos complejos se caracterizan porque contienen ácidos grasos como componentes, comprenden a los aciglicéridos, los fosfoglicéricos, los esfingolipidos, y las ceras; difieren en la estructura esqueletos a los que se hallan unidos por covalencia. Los principales lípidos complejos son:

**b.1 Acigliceroides:** Se llaman aciglicéridos o glicéridos a los ésteres de los ácidos grasos y del alcohol glicerina.

**b.2 Monoglicéridos y Diglicéridos:** Estos se encuentran en la naturaleza pero en cantidades menores que los triglicéridos.

**b.3 Triglicéridos:** Son sólidos a temperatura ambiente, se le conoce generalmente por "grasas" y los que son líquidos se denominan aceite.

**b.4 Fosfoglicéricos:** Llamados también gliceril-fosfátidos, son componentes principales característicos de las membranas celulares, aunque cantidades muy pequeñas de fosfoglicéridos están presentes en otras localizaciones de la célula. En los fosfoglicéridos, uno de los grupos hidroxilo primario de la glicerina se halla esterificado por el ácido fosfórico, los demás grupos hidroxilo lo son por ácidos grasos. Los grupos de cabezas polares de los fosfátidos pueden ser aportados también por una molécula de azúcar; se han encontrado fosfatidil-azúcares en los vegetales y en los microorganismos. No deben confundirse con otros tipos de glucolipidos que no contienen ácido fosfórico. Los plasmalógenos difieren de todos los demás fosfoglicéridos anteriores; uno de sus dos colas hidrocarbonadas es aportada por un ácido graso de cadena larga, que es específica a la posición dos de la glicerina, pero la otra es una larga cadena alifática alfa, beta, insaturada en posición cis unida por enlace éter. Los fosfoglicéridos son solubles en muchos disolventes no polares; a pH 7.0 todos los fosfoglicéridos poseen una carga negativa en el grupo fosfato. Una hidrólisis alcalina suave de los fosfoglicéridos produce ácidos grasos en forma de jabones; la fosfolipasa A, separa de modo específico el ácido graso de la

posición 1 y la fosfolipasa A2 el de la posición 2. La eliminación de una molécula de ácido graso de un fosfoglicérido origina un lipofosfoglicérido; la fosfolipasa B, que es una mezcla de fosfolipasas A1 y A2 puede efectuar la separación sucesiva de los ácidos grasos de los fosfoglicéridos.

**b.5 Esfingolípidos:** Los esfingolípidos son lípidos complejos cuyo esqueleto está constituido por la esfingosina o una base relacionada, todos los esfingolípidos contiene tres componentes básicos característicos: una molécula de ácido graso, una molécula de esfingosina o de uno de sus derivados y un grupo de cabeza polar, el cual, en algunos esfingolípidos es muy grande y complejo.

La base esfingosina se halla conectada por su grupo amino, mediante un enlace amida, a un ácido graso saturado de cadena larga o un monoinsaturado de 18 a 26 átomos de carbono.

**b.6 Ceramidas:** El compuesto resultante, que posee dos colas no polares se llama ceramida; es la estructura originaria característica de todos los esfingolípidos.

**b.7 Esfingomielinas:** Contienen fosforil-etanolamina o fosforil-colina con grupos de cabezas polares esterificados al grupo hidroxilo uno de la ceramina, a pH 7.0 son iones híbridos.

**b.8 Glucoesfingolípidos:** Poseen carga eléctrica, los más sencillos son los cerebrosidos que contienen como grupo de cabeza polar un monosacárido unido mediante enlace beta-glucosídico al grupo hidroxilo de la ceramida.

**c) Simples (no saponificables).**

Los lípidos sencillos no contienen ácidos grasos, aparecen en las células y en los tejidos en cantidades menores que los lípidos complejos; pero se hallan entre ellos muchas sustancias con intensa actividad biológica, como las vitaminas, hormonas y otras biomoléculas solubles en las grasas muy especializadas. Los principales lípidos simples son:

**c.1 Terpenos:** Están contruidos por unidades múltiples de hidrocarburo de cinco átomos de carbono (isópreno), los terpenos que contienen dos unidades de isópreno se denomina sesquiterpenos y los que contienen cuatro, seis y ocho unidades reciben el nombre de diterpenos, triterpenos y tetrarpenos, respectivamente.

**c.2 Escualeno:** Precursor importante en la biosíntesis del colesterol.

**c.3 Carotenoides:** Son una clase de hidrocarburos tetraterpénicos y sus derivados oxigenados se caracterizan porque la ordenación "cabeza-cola" de las unidades de isopreno se halla característicamente invertidos en el centro de la molécula.

**c.4 Vitamina A:** La vitamina A se halla presente sólo en productos animales, como mantequilla, huevos y aceites de hígado de pescado, los vegetales contienen una sustancia oleosa llamada caroteno, la cuál puede desdoblarse para producir dos moléculas de vitamina A dentro de las células animales.

**c.5 Vitamina E:** Actúa como antioxidante y protector de algunos componentes celulares lábiles, impidiendo su oxidación; también desempeña una función como constituyente del sistema de transporte de electrones, si bien se desconoce la índole exacta de la misma.

**c.6 Vitamina K:** La coagulación normal de la sangre, relacionada con la elaboración de protombina por el hígado, guarda relación con la acción específica de cierto número de compuestos químicos similares englobados bajo el término de vitamina K. Estos elementos con acción similar se encuentran en gran número de alimentos, además de ser elaborados por bacterias en el intestino humano, de modo que la abitaminosis K resulta más un defecto de absorción que de carencia en el régimen alimenticio. Debido a que sólo es posible su absorción en presencia de sales biliares (lo mismo que la de las vitaminas A, D y E), la obstrucción de las vías hepáticas tiene por resultado el déficit de vitamina K, sin importar su cantidad en el régimen o la que pueda elaborarse por bacterias intestinales.

**c.7 Coenzima Q:** Funcionan como transportadores de hidrógeno en las oxidaciones biológicas de las mitocondrias, contienen un anillo de quinona que puede reducirse y reoxidarse después, y una larga cadena lateral isoprenoide cuya longitud difiere según el organismo.

Los Plastoquinonas: se encuentran en los cloroplastos donde actúan en la fotosíntesis; las más importantes son:

- **Esteroides:** Son derivados del hidrocarburo tetracíclico saturado (perhidrociclopentano), difieren en el número y en la posición de sus dobles enlaces, en el tipo, localización y número de sus grupos funcionales

sustituyentes, en la configuración (alfa o beta) de los enlaces entre sus grupos sustituyentes y el núcleo; también difieren en la configuración que adoptan los anillos entre sí ya que el hidrocarburo originario posee seis centros de asimetría. Los principales puntos de sustitución son el carbono3 de anilloA, el carbono11 del anilloC y el carbono 17 del anillo D.

- Lanosterol: Fue encontrado por primera vez en la cubierta cerea de la lana en forma esterificada, antes de ser definido como un intermediario importante en la biosíntesis del colesterol en los tejidos animales.
- Ergosterol: Es aquel que se convierte en vitamina D por irradiación de la luz solar.
- Andrógenos: Son aquellas hormonas sexuales femeninas.
- Estrógenos: Son aquellas hormonas sexuales masculinas.
- Progesterona: Es una hormona progestógena.
- Prostaglandinas: Constituyen una familia de derivados de los ácidos grasos que poseen una gran variedad de potentes actividades biológicas de naturaleza hormonal o reguladora. Se designan de acuerdo con los sustituyentes presentes en el número de dobles enlaces adicionales en la cadena lateral, que poseen la configuración cis. Las prostaglandinas mejor conocidas son las E1, E1 alfa, y F2 alfa, se designan abreviadamente por PGE1, PGF1 alfa y PGE2 alfa respectivamente; estas a su vez, son las progenitoras de otras prostaglandinas biológicamente activas. Las prostaglandinas difieren entre sí respecto a su actividad biológica, aunque todas muestran por lo menos alguna actividad depresora de la presión sanguínea e inductora de la contracción de los músculos lisos.

Función y distribución de los lípidos en los alimentos: son de consistencia grasosa u oleosa; algunos como el cebo de res o el tocino son sólidos a temperaturas ordinarias, otras son líquidas (aceite de oliva, aceite de hígado de bacalao); cada molécula de grasa está formada por un de glicerina y tres de ácido graso. Son importantes como combustibles y como componentes estructurales de las células, el glucógeno o almidón se transforma rápidamente en glucosa y se metaboliza para liberar energía cada gramo de grasa suministra más el doble de energía que una cantidad equivalente de carbohidratos, por lo que estos compuestos resultan más económicos para el

almacenamiento de reservas de alimento. Los carbohidratos pueden ser transformados por el organismo en grasas y almacenados en esta forma, lo que equivale al hecho bien conocido de que almidones y azúcares "engordan". Las grasas son elementos estructurales importantes del organismo, los depósitos de grasa no son simplemente depósitos a largo plazo de alimentos usados solamente en estados de inanición, sino que se usan constantemente y se vuelven a formar.

Función y distribución de las vitaminas Hiposolubles en los alimentos. La vitamina A se halla presente sólo en productos animales, como mantequilla, huevos y aceites de hígado de pescado, pero los vegetales contienen una sustancia oleosa llamada carotena, la cual puede desdoblarse para producir dos moléculas de vitamina A dentro de las células animales; la propia vitamina es liposoluble y puede ser almacenada en el organismo humano especialmente en el hígado; el requerimiento diario para un adulto es de 1.5 mg. La vitamina D es otra vitamina liposoluble con la característica única de que puede elaborarse en el organismo por el estímulo de la luz solar sobre el elgosterol, normalmente está presente en la piel, se encuentra en los aceites de hígado, grasa animales, huevos y leche. La carencia de vitamina E da motivo a la progresiva disfunción de los músculos con parálisis posiblemente por degeneración de nervios; ciertas afecciones paralíticas humanas han sido tratadas venturosamente con preparados a partir de vitamina E. Con respecto a la vitamina K; la coagulación normal de la sangre relacionada con la elaboración de protombina por el hígado, guarda relación con la acción específica de cierto número de compuestos químicos similares englobados bajo el término de vitamina K; estos elementos con acción similar se encuentran en gran número de alimentos, además de ser elaborados por el intestino humano. La a vitamínosis K resulta más un efecto de absorción que de carencia en el régimen alimenticio.

#### 4.4.4 Lignina

Después de la celulosa y la hemicelulosa, es el compuesto orgánico más abundante de la Tierra, por lo general constituye entre el 10 y el 30 % de la biomasa. Es el resultado de la polimerización enzimática de alcoholes aromáticos como el transconiferol, el alcohol transinapil, y el alcohol transmaril,

entre otros. Da lugar a una estructura muy compleja y resistente a la degradación química y enzimática.

La lignina se presenta como una red tridimensional localizada entre las micelas de celulosa de los tejidos de celulosa del soporte de las plantas. Básicamente, la lignina es un polifenol de alto peso molecular que consiste de unidades construidas a partir de derivados de fenilpropano; desde el punto de vista evolutivo, la lignina apareció por primera vez en los musgos, aparentemente las ligninas típicas manifiestan una diferenciación filogenética. En las plantas, las ligninas son sintetizadas por medio de la deshidratación y condensación de alcoholes aromáticos, tales como el coniferílico, sinapílico y cumarílico.

**a) Taninos.** Los taninos son cuantitativamente mucho menos importantes que las ligninas, pero son de más amplia distribución; su nombre se deriva de su capacidad para teñir pieles. En cuanto a su composición y comportamiento son intermedios entre la lignina y la celulosa; disponen de grupos carboxilo y fenólicos sobre sus estructuras aromáticas. La composición química de los taninos varía notablemente, pero todos son derivados complejos del ácido gálico o elágico. De acuerdo con Francia (1954), los taninos se encuentran, principalmente, en las plantas superiores, aunque también en las algas y hongos, en las plantas superiores se concentran, especialmente, en la corteza (hasta 17%) y en las hojas (hasta 6.5%).

**b) Complejo lignina – Celulosa.** La asociación lignina – celulosa existente en la pared celular de las plantas, constituye uno de los materiales biológicos más resistentes de la naturaleza; sin embargo, a pesar de que la estructura química, tanto de la lignina como de la celulosa está perfectamente determinada, la conformación de la unión entre ellas es aún desconocida; Existen en la actualidad, tres modelos para explicar la interacción entre la lignina y la celulosa:

- Un enlace químico covalente
- Un enlace de hidrógeno entre los constituyentes
- Incrustación, donde la estructura tridimensional de la lignina, encajona, cubriendo totalmente a la celulosa, impidiendo el acceso de los agentes hidrolíticos.

La explicación más congruente es que la lignina y la celulosa se interpenetran

entre sí, uniéndose, tanto por enlaces covalentes, como de hidrógeno.

En los materiales lignocelulósicos, la hemicelulosa se encuentra unida a la celulosa por medio de un enlace carbono oxígeno, mientras que la pectina se encuentra unida a la hemicelulosa por un enlace glucosídico.

**c.1 Almidón.** El almidón es un polímero que funciona como sustancia de reserva en las plantas, está formado por unidades de glucosa. El almidón se encuentra en dos formas, la alfa amilosa y la amilopectina. La primera está constituida por cadenas largas no ramificadas en las que todas las unidades de D – Glucosa se hallan unidas mediante enlaces glucosidos alfa. La amilopectina está muy ramificada, las ramificaciones se hallan constituidas por unas doce unidades de glucosa y aparecen, en promedio cada doceavo resto de glucosa.

#### 4.4.5 Porfirinas

Las porfirinas son compuestos cíclicos de cuatro anillos pirrólicos enlazados por puentes de metenilo. Una propiedad característica de las porfirinas es la de formar complejos con iones metálicos unidos a los átomos de nitrógeno de los anillos pirrólicos. Ejemplos de las fenoporfirinas son el hem de la hemoglobina y la porfirina que contienen magnesio, la clorofila, y el pigmento fotosintético de los vegetales.

En la naturaleza, las metaporfirinas se encuentran conjugadas a las proteínas para formar muchos compuestos importantes en los procesos biológicos, entre los que se incluyen los siguientes:

- a) **Hemoglobinas.** Son ferroporfirinas unidas a la proteína globina. Estas proteínas conjugadas poseen la propiedad de combinarse de manera reversible con el oxígeno; sirven como medio de transporte del oxígeno en la sangre.
- b) **Eritrocruorinas.** Son proteínas ferroporfirínicas que existen en la sangre y en los líquidos tisulares de algunos invertebrados. Su función corresponde a la de la hemoglobina.
- c) **Mioglobinas.** Son pigmentos respiratorios que existen en las células musculares de los vertebrados e invertebrados. Un ejemplo es la mioglobina que fue obtenida del músculo cardíaco del caballo y cristalizada por Theorell en 1934; una molécula de mioglobina es semejante a una subunidad de

hemoglobina.

- d) **Citocromos.** Son compuestos que actúan como agentes de transferencia de electrones en las reacciones de oxidorreducción. Un ejemplo importante es el citocromo c, que tiene un peso molecular cercano a 13,000 y contiene un átomo – gramo de hierro por mol.
- e) **Catalasas.** Son enzimas ferroporfirínicas, varias de las cuales se han obtenido en forma cristalina, de las plantas; la actividad de las catalasas es mínima, pero las enzimas peroxidasa ferroporfirínica realizan funciones semejantes.
- f) **Triptófano pirrolasa.** Esta enzima cataliza la oxidación del triptófano a formilquinurenina, es una proteína ferroporfirínica.

#### 4.5 Características de la roca generadora.

La roca generadora, es aquella secuencia sedimentaria que ha generado o es potencialmente generadora de petróleo o gas; La distribución de este tipo de roca en una cuenca sedimentaria depende de las condiciones del relieve y del clima reinante durante la época del depósito (Paleogeografía). En general cualquier roca que contenga más del 1% de carbono orgánico total (COT) puede ser considerada como una roca generadora. Todas las rocas generadoras son sedimentarias sin llegar al metamorfismo y la mayor parte de ellas son las lutitas, las calizas arcillosas, las lutitas calcáreas y las margas.. Esta roca puede estar limitada fuera del área del yacimiento de petróleo, puede extenderse, con características litológicas y físicas uniformes a gran distancia del yacimiento. Las localizaciones donde se genera el petróleo son aquellas donde se tiene una abundante masa de agua y abundantes aportes orgánicos a un ambiente reductor.

Estas zonas pueden ser:

- Lagos: Normalmente en un contexto tectónico activo y en zonas ecuatoriales donde la estratificación de las aguas (por salinidad o densidad) impide la mezcla de las aguas superficiales y profundas.
- Deltas: La roca generadora son las lutitas del prodelta, con materia orgánica procedente de vegetales transportados por los ríos y materia orgánica de fito y zooplancton.
- Cuenas marinas semicerradas con un balance positivo (mayor entrada de agua dulce que de agua salada) y con un modelo de circulación de esteros.
- Cuenas marinas abiertas, en zonas de superficie donde se produce una zona de mínimo oxígeno (anóxica).
- En plataformas y cuencas profundas en períodos de máxima transgresión.

El estudio de un mapa de ubicación de las manifestaciones de petróleo en el mundo, ya se trate de indicios superficiales o de yacimientos de petróleo y gas explotados comercialmente, superpuesto a un mapa geológico, muestra que el petróleo se encuentra en condiciones geológicas muy variadas, tanto en lo que concierne a la edad y naturaleza de los terrenos, como a su posición en el marco tectónico regional. Un análisis más detallado indica que la existencia de hidrocarburos y con mayor razón la existencia de yacimientos explotables, está

ligada a la asociación de ciertas facies en un mismo conjunto geológico (secuencia estratigráfica); es la presencia de tal asociación lo que constituye la llamada serie petrolífera. La existencia de una o varias series petrolíferas en un conjunto de terrenos, condiciona la existencia de una cuenca o provincia petrolífera.

De una forma más precisa, una provincia petrolífera se puede definir como un conjunto sedimentario donde los hidrocarburos están siempre ligados a formaciones sedimentarias y existen dos o más campos petroleros. En esas zonas se encuentran reunidas, las diferentes condiciones necesarias para:

- La génesis de los hidrocarburos,
- La migración,
- Su protección a los agentes destructores,
- Su acumulación en yacimientos explotables,

Es decir, se encuentran reunidas diferentes facies entendiendo el término de facies en su sentido general: un cierto volumen de roca, caracterizado por la misma asociación físico-química petrográfica y paleontológica, resultante de una sedimentación en condiciones geográficas, tectónicas, físico-químicas y biológicas determinadas; bien por la presencia de todas ellas, o por la interacción de dos o varias de las enumeradas anteriormente, que son responsables de una o varias de las condiciones favorables para la existencia de yacimientos.

Las facies correspondientes a las condiciones necesarias para la génesis de hidrocarburos, se designan con el nombre de rocas generadoras.

Las rocas almacén, corresponden a las facies favorables para la circulación y acumulación de los hidrocarburos formados, quedando asegurada su protección por la presencia de las facies llamadas rocas sello (de cobertura), en contacto directo con las rocas almacén.

Finalmente la presencia de una trampa donde se realiza la acumulación de petróleo y gas está igualmente ligada de una manera importante, a la interdigitación de las diferentes facies favorables. Siempre hay influencia de movimientos tectónicos que juegan un papel importante, no solamente por las deformaciones creadoras de trampas, sino también por sus implicaciones en la sedimentación.

El reconocimiento de estas facies, sus asociaciones y el estudio de su repartición en una cuenca sedimentaria, son los objetivos esenciales de toda exploración petrolífera; desde el momento que se puede conocer su situación geológica regional, una gran parte de la exploración petrolífera se encuentra resuelta. El problema está lejos de ser simple, se necesita para llegar a una solución un conocimiento exhaustivo de diversos elementos correspondientes a todas las ramas de la Geología. Es indispensable conocer no solamente las características actuales de las rocas o de las facies que forman parte de la composición de las series petrolíferas, sino también conocer mejor su distribución, las condiciones de su génesis en el caso particular de la cuenca que se aborde en la exploración. Debido a la gran variabilidad de estas condiciones, tal conocimiento profundo no puede ser obtenido más que después de trabajos. Con diferentes enfoques geológicos.

El petróleo está siempre ligado a las formaciones sedimentarias, aunque es posible citar escasos ejemplos donde los hidrocarburos han sido encontrados en forma de indicios o de yacimientos explotables, en rocas metamórficas, o ígneas sin embargo se observa que existen siempre en sus proximidades rocas sedimentarias, de donde han podido venir por migración. Esta es una de las principales observaciones que han orientado a los geólogos, hacia la hipótesis del origen orgánico de los hidrocarburos, en oposición a las hipótesis o teorías inorgánicas.

Como consecuencia, se limita la extensión de la exploración petrolera, solamente a las cuencas sedimentarias, pero inversamente, toda la región del globo terrestre cubierta por secuencias sedimentarias, merece ser examinada desde el punto de vista petrolífero.

El petróleo no está ligado a un horizonte estratigráfico determinado, se conocen yacimientos en todos los horizontes de la escala estratigráfica desde el Paleozoico al Cenozoico (Cámbrico-Plioceno).

En la tabla 4.6 se indican los porcentajes aproximados de las producciones obtenidas en diferentes edades, se muestra tres máximos principales, en el Mio-Plioceno, Cretácico y Carbonífero Superior-Pérmico. Estos tres grupos de sistemas, corresponden al final de las grandes fases orogénicas, cuya influencia, se dejó sentir sobre una gran parte de la superficie del globo

terrestre. Los periodos postorgénicos, debido al hecho del rejuvenecimiento de los relieves continentales y de la reactivación de la subsidencia, consecuencia de los reajustes posttectónicos, reunieran las condiciones de sedimentación más particularmente favorables para la formación de las facies generadoras de hidrocarburos.

Sistemas	Porcentajes
Plioceno	20
Mioceno	21
Oligoceno	6
Eoceno	4
Cretácico (principalmente superior)	16
Jurásico	3
Triásico	0.05
Pérmico	5
Pensilvánico	9
Misipico	5
Devónico	4
Silúrico	1
Ordovícico	5
Cámbrico	1

Tabla 4.6 Porcentajes aproximados de las producciones obtenidas en diferentes edades.

#### 4.6 Factores que influyen en la formación de la roca generadora.

Existen factores importantes que influyen en la formación de la roca generadora, estos factores se asocian con secuencias sedimentarias, principalmente lutitas, calizas arcillosas, margas, areniscas, y limonitas; también es importante la historia Geológica de la cuenca de depósito que debe ser favorable a la formación de la roca generadora. Se considera que los siguientes factores son los más importantes:

- **Clima.** El clima controla la producción de materia orgánica, que es el constituyente esencial de donde provienen los hidrocarburos; por lo que las zonas aptas para el desarrollo de abundante materia orgánica (vegetal y animal) son las áreas climáticas tropicales o subtropicales, en donde generalmente habrá mayores posibilidades de formación de hidrocarburos.
- **Ambiente tectono- sedimentario,** que controla la subsidencia, los aportes de sedimentos y la velocidad de enterramiento. Los siguientes aspectos son relevantes:
  - a) **Subsidencia.** Para que se puedan acumular los hidrocarburos, se requiere

un equilibrio entre la producción de materia orgánica y la subsidencia, puesto que si ésta es muy grande, se diluirá la materia orgánica, mientras que si es escasa o nula subsidencia, la materia orgánica estará expuesta durante mayor tiempo a las inclemencias bioclimáticas.

- b) Aporte de detríticos. Si tenemos un gran aporte de materiales detríticos, nos encontraremos con una importante dilución de la materia orgánica y además, será un hidrocarburo de mala calidad.
- c) Velocidad de enterramiento. Un enterramiento rápido minimizará los efectos de la degradación biológica y favorecerá por tanto la preservación de la materia orgánica.
  - Ambiente físico-químico es el que controla acidez y el potencial de oxido-reducción.
- a) Acidez. La acidez controla la actividad bacteriana, la disponibilidad de nutrientes y la descomposición química.
- b) Potencial de oxido-reducción. Bajo condiciones oxidantes tenemos una fuerte degradación de la materia orgánica, en cambio en condiciones reductoras se conserva esa materia orgánica.

#### **4.7 Clasificación de las rocas generadoras.**

El análisis de grandes regiones petroleras, muestra que varios tipos de asociación de facies, resultantes de medios de sedimentación muy diferentes, pueden reunir las condiciones necesarias para la génesis de los yacimientos de petróleo. Aunque estas asociaciones pueden parecer muy variadas en detalle, se agrupan en dos categorías principales, a menudo relacionadas entre sí.

- 1) Las series arcilloso-arenosas y limosas corresponden al tipo de sedimentación detrítica, se forman por aportes terrígenos, en general abundantes. Las calizas pueden estar ausentes o muy poco desarrolladas. A este tipo, corresponden principalmente las series Silúrico-Devónicas del Sahara, Carboníferas del borde de los Apalaches, Cretácicas y Terciarias de California, Golfo de México, Venezuela, Cáucaso y Rumanía.
- 2) Las series carbonatadas, corresponden a procesos de precipitación química y bioquímica. Las rocas de textura gruesas son raras en estas series, mientras que por el contrario, los organismos coloniales constructores

(Políperos, Algas; etc.), juegan un papel muy importante. A este tipo pertenecen las series Cámbrico- Ordovícicas de Texas y Oklahoma, Devónicas de Canadá, Carboníferas Pérmicas de Texas y los Urales, Jurásicas y Cretácicas de Arabia Saudita, México, y Cenozoicas de Aquitania, Libia e Irán.

Estos dos grandes tipos de series, corresponden a medios de sedimentación y a posiciones geográficas y tectónicas en la cuenca sedimentaria, muy diferentes entre sí. Estas condiciones han sido estudiadas muy detalladamente, y se ha demostrado que puede haber coexistencia de los dos medios de sedimentación, en la misma cuenca y época. Se conocen casos en que la intercalación de los dos tipos de serie (detritica y carbonatada) ocupa una superficie suficientemente importante como para que se haya llegado a distinguir un tercer tipo de serie, llamada serie mixta. Teóricamente la aparición de una formación carbonatada en la cima de un conjunto detritico, es normal en el caso de una transgresión. La inversa es decir, las series detriticas sobre las calizas, aparece en el caso de una regresión.

Aunque la gran mayoría de los autores admiten actualmente que la presencia de una facies-generadora de hidrocarburos es indispensable para la formación de yacimientos en una cuenca sedimentaria, se debe señalar que el hecho de que a veces es difícil precisar cuál ha sido la roca madre de un yacimiento. El simple hecho de que haya discusiones sobre la existencia de roca generadora próximas al yacimiento, es bastante significativo de las dificultades encontradas para determinar cuales fueron las rocas generadoras con certidumbre, al menos en algunas cuencas ricas en yacimientos de petróleo y gas. Los hidrocarburos pueden desplazarse a lo largo de distancias importantes, como consecuencia, las rocas generadoras pueden estar relativamente muy alejadas del yacimiento.

Los análisis geoquímicos efectuados por numerosos autores, indican que la materia orgánica es un constituyente normal de las rocas sedimentarias. Sólo un número muy pequeño de rocas, tal como ciertas arcillas rojas, areniscas y rocas metamórficas o volcánicas, se han encontrado completamente desprovistas de materia orgánica. Es sin embargo importante que sólo los sedimentos muy ricos en materia orgánica, hayan sido capaces de convertirse

en roca madre. Estos sedimentos cuyo origen corresponden con secuencias depositadas en medios donde no solamente existía una vida abundante, sino donde la mayor parte de la materia orgánica sedimentaria quedó protegida de las acciones oxidantes y transformada en hidrocarburos, se clasifican en:

- Sedimentos marinos francos, ricos en plancton.
- Sedimentos deltáicos, ricos en plancton y restos vegetales.
- Sedimentos continentales ricos en lignito.
- Sedimentos lacustres.

El estudio de estas condiciones, necesarias para la formación de una roca generadora, corresponde a la geoquímica. Las rocas generadoras corresponden con secuencias de textura fina, acumulados en medio reductor, en condiciones muy precisas de batimetría y salinidad. Esto significa que todas las rocas que contengan una porción importante de materia orgánica, juegan necesariamente un papel de roca generadora.

En algunos casos la roca potencialmente generadora o produjo jamás una gota de petróleo; ya sea porque la materia orgánica no se transformó en hidrocarburos libres, como sería el caso de las lutitas bituminosas ricas en "keró-bitúmen", o bien porque la evolución del sedimento no permitió a los hidrocarburos desplazarse hacia horizontes almacén. El estudio geológico es el que determinará en función de la historia de la cuenca sedimentaria, si las rocas potencialmente generadoras desde el punto de vista geoquímico, se han encontrado en condiciones favorables para ceder sus fluidos a las formaciones almacén.

En la práctica, el estudio geoquímica proporciona información suficiente para evaluar la calidad y cantidad de materia orgánica contenida en una secuencia sedimentaria. Se considera como roca madre probable toda secuencia:

- De textura fina, que favoreció en el momento de la sedimentación, el enterramiento y la protección de la materia orgánica.
- Depositada en medio reductor marino o no. Este medio está atestiguado por la presencia frecuente de minerales sulfurados (pirita), la ausencia o rareza de fósiles que no sean pelágicos (Foraminíferos y Algas planctónicas, dientes de peces, etc.), y en particular la ausencia de trazas de animales excavadores bentónicos.

- De color oscuro, gris o marrón oscuro a negro, debido a la presencia de una proporción todavía importante de materia orgánica residual, que se presenta muy a menudo bajo la forma de kero-bitumen insoluble, pero que puede incluir trazas más o menos importantes de betún libre, soluble en los disolventes orgánicos; en general, son productos pesados del tipo asfáltica.

En la mayor parte de los casos, y sobre todo en las series detríticas, las rocas generadoras están representadas por arcillas oscuras, finamente bandeadas.

En las series calcáreas, o que no tienen cambios arcillosos francos, las rocas generadoras parecen estar constituidas por calizas finas, muy a menudo arcillosas, o de limos calcáreos ricos en materia orgánica.

#### 4.7.1 Serie arcillo - arenosa.

Como ya mencionamos las series arcilloso-arenosas, corresponden al tipo de sedimentación detrítica y se forman por aportes terrígenos, en general abundantes. Sus principales características residen, en corresponder con areniscas de grano fino con abundante matriz intercaladas con lutitas y/o limonitas; las calizas pueden estar ausentes o muy poco desarrolladas. Entre las secuencias importantes en la formación de las rocas generadoras de la serie arcillo – arenosa se encuentran las siguientes:

##### a) Arcilla.

La arcilla tiene gran importancia en la geología del petróleo, está presente en la mayor parte de las rocas generadoras en mayor o menor medida; tiene mucho que ver con las cuestiones vinculadas a la porosidad y a la permeabilidad del depósito; influye de manera determinante en la producción de gas y petróleo de muchos yacimientos.

La compactación y compresibilidad de los sedimentos dependen en gran medida del escurrimiento del agua de los minerales de arcilla; el alto contenido mineral del agua de los campos petrolíferos se debe en gran parte a que se liberan sales adsorbidas en los minerales de arcilla. Por otra parte las arcillas son el principal componente del lodo de perforación.

La presencia de minerales de arcilla tiene el mismo efecto en las rocas productivas generadoras de tipo de la serie arcillosa y de la serie carbonatada.

Los minerales de arcilla se presentan en las rocas carbonatadas en las separaciones de los planos de estratificación y en todos los demás casos como

delgadas láminas de lutita; esas separaciones pueden consistir en material arcilloso coloidal escamoso arrastrado hasta las áreas de depositación. El petróleo está constituido por un conjunto de hidrocarburos formados naturalmente por reacción catalítica de la materia orgánica de origen animal y vegetal, actuando las arcillas y los lodos (silicatos de aluminio) como catalizadores de las mismas.

El término arcilla se usa habitualmente con diferentes significados:

- Desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales que corresponden con, aluminosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades fisico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior siempre a 1/256 mm).
- Desde el punto de vista petrológico la arcilla de las rocas sedimentarias, en la mayor parte de los casos es de origen detrítico, con características bien definidas. Para un sedimentólogo, arcilla es un término granulométrico, que abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 1/256 mm.

Por tanto, el término arcilla no sólo tiene connotaciones mineralógicas, sino también de tamaño de partícula. Según esto, todos los aluminosilicatos pueden considerarse verdaderas arcillas incluso minerales no pertenecientes al grupo de los silicatos hidratados (cuarzo, feldespatos, etc.) pueden ser considerados partículas arcillosas. Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos, debido a que son en su mayor parte, productos finales de la meteorización de los silicatos que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan.

Las propiedades de las arcillas son consecuencia de sus características estructurales, por ello es imprescindible conocer la estructura de los filosilicatos para poder comprender sus propiedades.

Las arcillas, al igual que el resto de los filosilicatos, presentan una estructura basada en el apilamiento de planos de iones oxígeno e hidroxilos; los grupos tetraédricos  $(\text{SiO})_4^{4-}$  se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas de extensión infinita y fórmula  $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$ , que constituyen la unidad fundamental de los filosilicatos. En ellas los tetraedros se distribuyen formando hexágonos. El silicio tetraédrico puede estar, en parte, sustituido por  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{Fe}^{3+}$ .

Estas capas tetraédricas se unen a otras octaédricas de tipo Gibbsita o Brucita, en ellas algunos  $Al^{3+}$  o  $Mg^{2+}$ , pueden estar sustituidos por  $Fe^{2+}$  o  $Fe^{3+}$  y más raramente por Li, Cr, Mn, Ni, Cu o Zn. El plano de unión entre ambas capas está formado por los oxígenos de los tetraedros que se encontraban sin compartir con otros tetraedros (oxígenos apicales), y por grupos  $(OH)^-$  de la capa brucítica o gibsítica, de forma que, en este plano, quede un  $(OH)^-$  en el centro de cada hexágono formado por 6 oxígenos apicales. El resto de los  $(OH)^-$  son reemplazados por los oxígenos de los tetraedros.

Una unión similar puede ocurrir en la superficie opuesta de la capa octaédrica, así, los filosilicatos pueden estar formados por dos capas: tetraédrica más octaédrica y se denominan bilaminares, 1:1 o T:O; o bien por tres capas, una octaédrica y dos tetraédricas, denominándose trilaminares, 2:1 o T:O:T. A la unidad formada por la unión de una capa octaédrica más una o dos tetraédricas se la denomina lámina.

Si todos los huecos octaédricos están ocupados, la lámina se denomina trioctaédrica ( $Mg^{2+}$  es dominante en la capa octaédrica). Si solo están ocupadas dos tercios de las posiciones octaédricas y el tercio restante está vacante, se denomina dioctaédrica (el  $Al^{3+}$  es el catión octaédrico dominante).

En algunos filosilicatos (esmectitas, vermiculitas, micas, etc.) las láminas no son eléctricamente neutras debido a las sustituciones de cationes por otros de distinta carga. El balance de carga se mantiene por la presencia en el espacio interlaminar o en el espacio existente entre dos láminas consecutivas, de cationes (como por ejemplo en el grupo de las micas), cationes hidratados (como en las vermiculitas y esmectitas) o grupos hidroxilo coordinados octaédricamente, similares a las capas octaédricas, como sucede en las cloritas; a éstas últimas también se las denomina T:O:T:O o 2:1:1. La unidad formada por una lámina más la interlámina es la unidad estructural; los cationes interlaminares más frecuentes son alcalinos (Na y K) o alcalinotérreos (Mg y Ca).

Las fuerzas que unen las diferentes unidades estructurales son más débiles que las existentes entre los iones de una misma lámina, por ese motivo los filosilicatos tienen una clara dirección de exfoliación paralela a las láminas.

También pertenecen a este grupo de minerales la Sepiolita y la Paligorskita, a

pesar de presentar diferencias estructurales con el resto de los filosilicatos. Estructuralmente están formadas por láminas discontinuas de tipo mica. A diferencia del resto de los filosilicatos, que son laminares, éstos tienen hábito fibroso ya que la capa basal de oxígenos es continua, pero los oxígenos apicales sufren una inversión periódica cada 8 posiciones octaédricas (Sepiolita) o cada 5 posiciones (Paligorskita); esta inversión da lugar a la interrupción de la capa octaédrica que es discontinua.

Los filosilicatos se clasifican atendiendo a que sean bilaminares o trilaminares y dioctaédricos o trioctaédricos (tabla 4.7). Como puede verse pertenecen a los filosilicatos, grupos de minerales tan importantes como las micas y las arcillas.

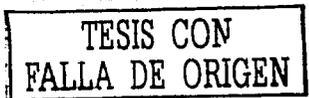
	DIOCTAÉDRICOS		TRIOCTAÉDRICOS		CARGA
BILAMINARES T:O 1:1	CANDITAS	Cadrita Nacrita	SERPENTINA	Artigorita Crisotilo	X = 0
		Dixita		Lizardita	
		Halosida		Bertrina	
TRILAMINARES T:O1 2:1	PROLITA		Talco	Saponita	X = 0 X = 0,2-0,6
			Montmorillonita		
	ESMECTITAS	Besidita Nontrolita	ESMECTITAS	Hectorita	
	Vermiculitas		Vermiculitas		X = 0,6-0,9
	ILITAS				X = 0,9
	MICAS	Muscovita Paracrato	MICAS	Epitita Floccato Lepidolita	X = 1
T.O.T.O 2:1:1	CLORITAS				
FIBROSOS	Paligorskita	Sepiolita			

Tabla 4.7 Clasificación de los filosilicatos.

Las importantes aplicaciones industriales de este grupo de minerales radican en sus propiedades físico-químicas; sus propiedades más importantes son:

- Su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 1/256 mm).
- Su morfología laminar (filosilicatos).
- Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores, presentan por una parte un valor elevado del área superficial y la presencia de una gran cantidad de superficie



activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas.

Por otra parte, la existencia de carga en las láminas se compensa con la entrada en el espacio interlaminaar de cationes débilmente ligados y con estado variable de hidratación, que pueden ser intercambiados fácilmente mediante la puesta en contacto de la arcilla con una solución saturada en otros cationes, a esta propiedad se la conoce como capacidad de intercambio catiónico y es también la base de multitud de aplicaciones industriales.

▪ **Superficie específica.**

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa, más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en  $\text{m}^2/\text{g}$ .

Las arcillas poseen una elevada superficie específica que es muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad.

A continuación se muestran algunos ejemplos de superficies específicas de arcillas:

- Caolinita de elevada cristalinidad, hasta  $15 \text{ m}^2/\text{g}$ .
- Caolinita de baja cristalinidad, hasta  $50 \text{ m}^2/\text{g}$
- Haloisita, hasta  $60 \text{ m}^2/\text{g}$ .
- Illita, hasta  $50 \text{ m}^2/\text{g}$ .
- Montmorilonita,  $80\text{-}300 \text{ m}^2/\text{g}$ .
- Sepiolita,  $100\text{-}240 \text{ m}^2/\text{g}$ .
- Paligorskita,  $100\text{-}200 \text{ m}^2/\text{g}$

La capacidad de Intercambio catiónico es por otro lado, una propiedad fundamental de las esmectitas, son capaces de cambiar fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales en los espacios interlaminares o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La capacidad de intercambio catiónico (CEC)

se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral; estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- Sustituciones isomórficas dentro de la estructura.
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- Disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80 % de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio. Los dos últimos tipos de origen varían en función del pH y de la actividad iónica, corresponden a bordes cristalinos químicamente activos que representan el 20 % de la carga total de la lámina. A continuación se muestran algunos ejemplos de capacidad de intercambio catiónico (en meq/100 g):

- Caolinita: 3-5
- Halosita: 10-40
- Illita: 10-50
- Clorita: 10-50
- Vermiculita: 100-200
- Montmorillonita: 80-200
- Sepiolita-paligorskita: 20-35

#### ▪ **Capacidad de absorción**

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmeclitas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita). La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa, depende para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La adsorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso.

▪ **Hidratación.**

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las esmectitas, su importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

La adsorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento, este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión; a medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectita, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si por el contrario tienen Ca o Mg como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

▪ **Plasticidad.**

Las arcillas son eminentemente plásticas esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

Generalmente la plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Retracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro

estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso (Jiménez Salas, et al. , 1975).

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla; existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla e incluso para un mismo mineral arcilloso en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

- **Tixotropía**

La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide, al amasarlo y a su posterior recuperación con el tiempo; las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido. Si a continuación se las deja en reposo recuperan la cohesión, así como el comportamiento sólido. Para que una arcilla tixotrópica muestre este especial comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido; por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico.

- **Arcillas bituminosas.**

Son rocas sedimentarias de grano fino (menor a 1/256mm) que contienen materia orgánica (kerógeno), al calentarse (destilación destructiva), las arcillas bituminosas desprenden cantidades importantes de hidrocarburos que son insolubles en los solventes comunes de petróleo. Como otros combustibles fósiles, el origen de las arcillas bituminosas involucra la depositación y sólo parcial descomposición de los detritos orgánicos. Los ambientes favorables para la formación de las arcillas bituminosas son los lagos, los arroyos estancados, las lagunas en las cercanías de los pantanos ricos en materia orgánica y en las cuencas marinas con circulación restringida. Después de millones de años, desde que el sedimento fue enterrado, una pequeña actividad tectónica desordena los sedimentos. Posteriormente, el levantamiento y basculamiento local de las rocas han expuesto a las arcillas bituminosas a la erosión. La identificación de los recursos de las arcillas bituminosas del mundo

ha permitido estimar su contenido en petróleo de unos 3 mil millones de barriles, pero aún no se ha realizado la evaluación de la calidad del petróleo. El impacto ambiental del desarrollo de los recursos de las arcillas bituminosas variará de acuerdo con la técnica de recuperación, como por ejemplo, la minería superficial y subsuperficial o las técnicas in situ. La tecnología de extracción del petróleo de estas arcillas aún es muy cara sin embargo, si los precios actuales suben lo suficiente, probablemente se le considere una fuente alternativa.

#### **b) Lutitas y limolitas.**

Son rocas detriticas constituidas por clastos de tamaño muy pequeño (menos de 1/16mm), en las cuales no se ven ni se notan al tacto sus clastos. Hay 2 tipos predominantes:

- Los Limos, tienen un tamaño de clasto entre 1/16 y 1/256mm tienen el aspecto de una arcilla pero algo más grueso, tienen un color gris, negro o amarillento, se les llama comúnmente barro.
- Las arcillas, tienen un tamaño más pequeño menores a 1/256mm, que le da un tacto suave.

En cualquier caso, las lutitas se componen generalmente de silicatos aluminicos hidratados en los que predomina la montmorilonita o arcilla impura de color gris o marrón. Sin embargo, tenemos un silicato aluminico llamado caolinita que tiene aspecto blanco por la ausencia de minerales de hierro en su composición; se caracteriza por su olor a tierra mojada cuando se humedece, por su carácter plástico y el cambio de coloración de gris a rojizo cuando se cuece.

Estos silicatos son el resultado de la acción del agua (hidrólisis carbonatos) sobre minerales silicatados que tengan las rocas de partida; cuando las zonas son secas o tienen hielos perpetuos, la ausencia de agua líquida impide transformar las rocas madres en arcillas. Por tanto, las lutitas son muy abundantes en zonas de climas templados húmedos y escasos en zonas desérticas o polares; también en zonas marinas las arcillas son muy

abundantes en zonas distantes de la costa.

#### c) Marga

Las margas se componen de arcillas y carbonatos, según las relaciones cuantitativas se distinguen margas arcillosas, margas y margas calcáreas; normalmente el carbonato es presentado por calcita, a veces por dolomita. Los componentes adicionales pueden ser cuarzo, mica y compuestos carbonosos. La marga frecuentemente lleva nódulos de yeso, calcita y pirita; es de color gris claro hasta oscuro, café o verdoso, frecuentemente contiene microfósiles y restos de hojas. El tamaño de los granos es igual al de la arcilla ( $< 1/256\text{mm}$ ), la estratificación es difícil de reconocer, pero la marga muestra una exfoliación buena. Se forma tanto en secuencias en agua dulce, como en el mar. Las morrenas de fondo se constituyen de una roca cálcica y arcillosa, molida y mezclada por las actividades del hielo y de los glaciares.

#### 4.7.2 Series carbonatadas.

Las rocas carbonatadas son rocas formadas mayoritariamente por carbonatos, cálcico (calcita en las calizas) o cálcico-magnésico (dolomita en las dolomías); de ellas, solo las calizas tienen un auténtico origen sedimentario, pues las dolomías se forman por procesos posteriores al depósito. Las rocas carbonatadas son importantes desde el punto de vista petrolero porque pueden ser rocas generadoras o almacenadoras.

#### a) Calizas

Los carbonatos se constituyen básicamente de calcita (caliza), aragonita y dolomita (dolomía), subordinadamente pueden participar cuarzo, feldspato alcalino y minerales arcillosos; los carbonatos de siderita son más escasos, incluso económicamente interesantes. Los procesos de la formación de carbonatos son del tipo marino orgánico, del tipo bioquímico y del tipo terrestre. Las condiciones de precipitación y la disolución de  $\text{CaCO}_3$  son los que determinan que se acumule o se disuelvan los carbonatos. La base química de la sedimentación de carbonatos es la abundancia relativamente alta de los iones de calcio  $\text{Ca}^{2+}$  y del bicarbonato ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) o de los iones de bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) respectivamente en el agua. Un ion de calcio y un ion de  $\text{HCO}_3^-$  se unen formando la calcita:  $\text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}^+$ .

En el equilibrio los iones de calcio y de  $\text{HCO}_3^-$  son disueltos, la precipitación inicia cuando hay cantidades mayores del ion de calcio o del ion de bicarbonato o cuando hay cantidades iguales de estos dos iones y su producto sobrepasa el valor determinante para la saturación. La disolución de un sedimento calcáreo o de una caliza en agua con un cierto contenido en  $\text{CO}_2$  se puede describir por las reacciones siguientes:

$\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$  y  $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ ; estas reacciones describen la meteorización química de los carbonatos y la disolución de sedimentitas calcáreas formando cavernas y vóculos.

Los principales parámetros, que influyen la disolución y la precipitación de  $\text{CaCO}_3$  son los siguientes:

- El contenido de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), cada proceso que aumenta el contenido en  $\text{CO}_2$  incrementa la disolución de  $\text{CaCO}_3$ , la disminución de la cantidad de  $\text{CO}_2$  favorece su precipitación.
- El potencial de hidrógeno (pH) influye la disolución y la precipitación de  $\text{CaCO}_3$ ; un valor bajo de pH favorece la disolución de  $\text{CaCO}_3$ , mientras que un valor alto de pH favorece su precipitación.
- La temperatura. La disolución de  $\text{CaCO}_3$  en agua pura disminuye con el aumento de la temperatura; Las aguas tibias superficiales de las áreas tropicales están supersaturadas con carbonato de calcio, ahí se forman calizas por precipitación. El agua de mar de temperaturas moderadas casi siempre está saturada con carbonato de calcio, esas condiciones ahí existe un equilibrio entre la precipitación y la disolución de carbonato.
- La presión. El aumento de la presión apoya levemente la disolución de  $\text{CaCO}_3$ , la influencia de la presión se nota en profundidades altas. En el mar en aguas profundas, desde la llamada profundidad de compensación de carbonatos (aproximadamente 4500 - 5000m), el carbonato se disuelve completamente. Los carbonatos cuando se litifican son entre otros, la caliza masiva, la caliza fosilífera, la caliza oolítica, la dolomía, y el travertino. estalactitas.

A continuación se describen los diferentes tipos de rocas que son importantes en las series carbonatadas como rocas generadoras.

**b) Caliza masiva**

Se constituye fundamentalmente de calcita, con arcilla se forma la caliza arcillosa y la marga, con arena se forma la caliza arenosa, con sílice se forma la caliza silícica, con restos orgánicos se forma la caliza bituminosa y con dolomita se forma la caliza dolomítica. La caliza masiva tiene fractura concoide y puede tener varios colores: blanco, amarillo, rosado, rojo, gris o negro; en contacto con ácido clorhídrico frío diluido se produce efervescencia. Sin la influencia de seres vivos la precipitación de calcita está limitada a los a 200 m de profundidad en el mar, puesto que solo en esta región el agua de mar está saturada de calcita. Pero la precipitación puramente química de la calcita en los 200 m superiores del mar no es muy frecuente. Normalmente las calizas marinas se producen a partir de diminutos esqueletos de seres vivos, que viven en las capas acuáticas superiores y que al morir caen al fondo de mar, donde constituyen los lodos de calcita.

**c) La caliza oolítica**

Se compone de un cúmulo de granos compactados de calcita de forma redondeada con diámetros entre 1 y 2 mm. Los granos crecen en el agua del mar supersaturado con  $\text{CaCO}_3$ , con profundidad menor de 2m; el ambiente está caracterizado por un cambio permanente de fases de movimiento y de reposo alrededor de gérmenes como granos de cuarzo o pedazos diminutos de caparazones de organismos. Si el diámetro de los granos sobrepasa los 2mm, son demasiado pesados para seguir el movimiento del agua.

**4.7.3 Rocas sedimentarias organógenas.**

Bajo la denominación colectiva de las rocas sedimentarias organógenas se tienen a todas las rocas sedimentarias con materia orgánica, como los depósitos carbonáceos la turba los lignitos y los depósitos de kerógenos.

**a) Los depósitos carbonáceos**

Los depósitos carbonáceos se componen de la materia orgánica, vegetal o de sus derivados subsecuentemente producidos, a menudo se presenta como minerales y componentes volátiles como agregados. A los depósitos carbonáceos pertenecen la turba, el lignito, el carbón y la hulla.

Las sustancias ricas en las precursoras de hidrocarburos que inclusive pueden producir gas y/o aceite por destilación son los kerógenos. El material de partida

para los depósitos carbonáceos son las plantas, como los equisetos, los licopodios, los juncos, las cañas, los arbustos y los musgos pantanosos entre otros. Las plantas crecieron en pantanos y lagos de agua dulce, que en parte se inundaron ocasionalmente por mares llanos en climas subtropicales hasta tropicales. Con ausencia de aguas subterráneas circulantes, la descomposición normal de los restos vegetales que se basa en la presencia de oxígeno termina enseguida bajo la cobertura de sedimentos y de otros restos vegetales, se forman posteriormente gases como el dióxido de carbono y el metano. Bajo condiciones no completamente aneróbicas puede formarse la turba cuando hay abundancia de restos de plantas superiores.

#### **b) La turba**

La turba se constituye de fragmentos de madera en una matriz de trozos desintegrados de vegetales pequeños típicos de las marismas y los pantanos, los fragmentos vegetales están atacados por los residuos no completamente descompuestos de la vegetación muerta, como las bacterias, los hongos y otros organismos. Las aguas subterráneas estancadas protegen la materia vegetal residual a descomponerse completamente.

La turba se caracteriza por la presencia de celulosa libre y por un contenido de agua mayor de 70%. La turba forma masas de color amarillo claro hasta café o negro de restos vegetales que están impregnados con agua.

#### **c) Los lignitos .**

El lignito es una roca combustible con un contenido de agua menor de 75% del volumen total y el resto de compuestos derivados de vegetales o vegetales que fueron transformados debido a la carbonización; en el lignito se puede reconocer macroscópicamente algunos trozos de madera, de hojas y de frutos. Otros componentes adicionales en poca cantidad pueden ser minerales arcillosos, siderita, piritita, calcita y otros. Los lignitos sólo aparecen en sedimentos no compactados o muy poco compactados. El límite inferior hacia la turba se traza con un contenido de agua del 75% del volumen, el límite superior hacia la hulla o el carbón se muestra por la variación del color de la raya de café (lignito) a café-oscuro a negro (hulla).

#### **d) El lignito pardo o lignito blando.**

El lignito pardo es un carbón húmico de grado bajo con un contenido de agua

entre 10 y 75%; este lignito se ubica entre la turba de grado más bajo y el lignito de grado más alto. El lignito pardo se parece a la turba, pero es más sólido y más denso. Los yacimientos del lignito pardo o blando de Alemania oriental (zonas de Leipzig, Halle, Magdeburgo y Cottbus) y de la Alemania oriental (cerca de Colonia, Baja Renania) son de edad Cenozoico.

**e) El lignito duro.**

Dentro de los lignitos duros se distinguen el lignito mate (más sólido y más oscuro con respecto al lignito blando y estratificado) y el lignito brillante más evolucionado con respecto a la carbonización. El límite superior hacia la hulla se traza con base en el color de la raya de las rocas; el lignito se caracteriza por un color de la raya café y la hulla por un color de la raya negro-café.

**f) El lignito xilolde o la xilita**

El lignito xilolde o la xilita es un lignito con trozos de madera fósil con estructura bien conservada.

**g) El carbón o la hulla**

El carbón o la hulla es una roca sedimentaria orgánica combustible con un contenido menor de 40% en sustancias minerales en base del material seco, se compone de polímeros de hidrocarburos cíclicas. Se distingue los carbones húmicos (*Humuskohle*) y los carbones sapropélicos (*Faulschlammkohle*). La hulla se distingue del lignito por la variación del color café y la hulla de color de la raya café-oscuro a negro. En el sistema se distingue entre el lignito de hulla por su valor calorífico y de su contenido en volátiles: el lignito tiene un valor calorífico menor de 5700kcal/kg, y en la hulla mayor de 5700kcal/kg. En Alemania se emplea una clasificación que toma como base del grado de carbonización, se distingue con graduaciones de carbonización ascendentes y el contenido descendente en gas o volátiles respectivamente (indicado en paréntesis), como se muestra en la tabla 4.9 Los carbones situados arriba de la antracita se denominan colectivamente las hullas bituminosas.

Nombre	% de gas (volátiles)
Carbón de llama	45-40%
Carbón de llama para gas	40-35%
Carbón para gas	35-28%
Carbón graso	28-19%
Carbón de fragua	19-14%
Hulla magra	14-10%
Antracita	menos de 10%

Tabla 4.9 Porcentaje de gas (Volátiles) en el Carbón.

En los yacimientos de carbón lutitas bituminosas las capas de hulla están estratificadas con otras rocas sedimentarias estériles. Independientemente de su estado de carbonización, se distingue los cuatro litotipos siguientes, que varían en el material vegetal de partida y en su entorno de sedimentación :

- **Hulla brillante:** de fractura concoidea, con muchas grietas encaradas en ángulo recto a la estratificación, se descompone en fragmentos en forma de bloques, no tiñe en negro; se presenta en capas principalmente continuas, raramente en forma de lentejones.
- **Hulla mate:** De superficies ásperas, forma fragmentos gruesos, no tiñe de color negro, forma estratos de carbón de brillo mate hasta graso y de color gris hasta negro de varios decímetros de espesor.
- **Hulla fibrosa:** de color negro hasta gris oscuro, de brillo sedoso, con textura fibrosa y porosa, fácilmente triturable, tiñe de color negro; se encuentran en forma estratos y lentejones delgados.
- **Hulla semibrillante:** no tiñe, forma capas aternas de rayas finas situadas entre la brillante y la hulla mate, de espesores menores de 3mm; tipo de carbón más importante con respecto a su volumen. Algunos yacimientos de hulla son las cuencas de Ruhr (carbonífero) y de Saar (carbonífero) en Alemania, en el macizo central francés y los depósitos de carbón de Lota cerca de Concepción en Chile.

#### h) Las rocas con kerogeno.

El kerogeno se define como un complejo de materia vegetal y animal diagenéticamente transformada al estado sólido y de origen sapropélico. Se

trata de los constituyentes de las rocas sedimentarias, que no son solubles en soluciones acuosas alcalinas ni en los solventes orgánicos comunes. La Kerogenita se refiere a un depósito con un contenido suficientemente alto en kerógeno para poder producir petróleo mediante la destilación.

#### **i) La sapropelita**

La sapropelita es un sapropel solidificado (sapropel = barro o lodo con un contenido variable de materia orgánica no identificable acumulado en un ambiente acuático sin oxígeno), que por destilación destructiva genera petróleo.

#### **4.8 Características Biológicas de la roca generadora.**

La determinación de una roca generadora está basada en su contenido y tipo de materia orgánica. Varios autores se apoyan en el hecho de que es difícil precisar cuál ha sido la roca generadora de un yacimiento, suponen que el petróleo o gas han podido formarse abajo o arriba de las rocas porosas donde se encuentra actualmente.

Las rocas generadoras pueden estar relativamente muy alejadas del yacimiento, donde el petróleo y el gas se han acumulado. El análisis óptico permite definir cualitativa y cuantitativamente cuatro tipos de materia orgánica.

1. Algáceo.
2. Herbáceo
3. Leñoso
4. Carbonoso.

La predominancia de la materia orgánica de los tipos algáceos y/o herbáceos, permite considerar que la roca generadora produciría hidrocarburos líquidos; así mismo los tipos leñosos y carbonosos dan lugar a hidrocarburos gaseosos. Si contiene materia mixta podemos considerar a la roca como generadora de petróleo y gas. Bitterli (1963) establece que la riqueza de materia orgánica no es inherente a ninguna litología en particular, pero tiende a estar mas asociada con los sedimentos de grano fino. Este hecho ha sido enfatizado por Hunt (1963), quien demostró que las partículas más pequeñas, aparentemente debido a su capacidad de absorción están asociadas con mayor cantidad de materia orgánica. Como se observa en la tabla 4.9, la arcilla muestra mayor

promedio en peso de materia orgánica en comparación del aluvión y arenas que cuentan con mayor porosidad y menor porcentaje de materia orgánica.

Tamaño de Partícula	Promedio % en peso de materia orgánica
Roca de aluvión endurecido	1.79%
Arcilla (2-4)	2.08%
Arcilla (menos de 2)	6.50%
Arenas	0.73%

Tabla 4.10 Relación del tamaño de las partículas en sedimentos y el promedio en porcentaje en peso de materia orgánica.

#### 4.8.1 Roca generadora y tipo de materia orgánica.

El tipo de materia orgánica es muy importante de cara a la generación de hidrocarburos. Por su composición y origen se puede dividir en cuatro tipos:

Grupo 1. Lutitas bituminosas de alta calidad. El origen es planctónico-lacustre, es decir, se acumula en lagos y pantanos habitualmente anóxicos. Es muy poco frecuente, dado que las zonas de acumulación (lagos) presentan un área limitada con respecto a las áreas de acumulación de otros tipos. Presentan un rendimiento excelente como roca generadora.

Grupo 2. Lutitas bituminosas de baja calidad. Su origen es planctónico-marino, habitualmente es acumulado en el mar en plataformas terrígenas (plataforma continental). Es mucho más frecuente que el grupo 1. Presenta en general una buena calidad.

Grupo 3. Vegetales superiores continentales, habitualmente acumulados en pantanos o deltas. Frecuentes. Su calidad es mediocre y generan hidrocarburos de poco valor energético.

Grupo 4. Residual, restos de materia orgánica diversa. Presentan una alteración fuerte tras su sedimentación. Muy poco productivos.

#### 4.8.2 Cantidad de materia orgánica.

La cantidad de materia orgánica en las rocas generadoras es expresada como el total de carbono orgánico (TOC). La mayoría de las lutitas y lechos rojos

tienen un porcentaje muy bajo de carbono orgánico ya que la materia orgánica ha sido destruida por la oxidación; en contraste las rocas dolomíticas, arcillosas y calcáreas de color oscuro se caracterizan por tener el más alto porcentaje de carbono orgánico.

Grandes cantidades de materia orgánica se encuentran preservadas en áreas en donde el oxígeno es eliminado y los organismos bentónicos son escasos. La falta de oxígeno restringe la descomposición por los procesos reductores y el efecto venenoso del sulfato de hidrógeno mata cualquier vida dentro del área.

La preservación y el transporte de sedimentos son los mecanismos que causan la alta concentración de materia orgánica, porque los valores de la materia orgánica pueden variar ampliamente dependiendo de la formación.

El investigador Lewan (1987), encontró por medio de experimentos en pirólisis que el mínimo de materia orgánica requerida para generar aceite es de 1.5 mientras que para el gas es solo necesario un 0.5% de materia orgánica.

#### **4.8.3 Calidad de materia orgánica.**

El factor más importante para la generación de aceite o gas es el contenido de hidrógeno en la materia orgánica de la roca. La cantidad de petróleo generado se incrementa al igual que el porcentaje atómico de hidrógeno carbono (H/C). La materia orgánica puede ser clasificada en:

- Sapropélica.
- Húmica.

El término sapropélico se refiere a la descomposición y polimerización de productos de engorda corresponde con materiales orgánicos lípidos, como esporas y plancton depositado en lodos subacuáticos. Usualmente la acumulación ocurre bajo condiciones de oxígeno restringido, la materia orgánica sapropélica como aceites, resinas y ceras muestran un porcentaje atómico alto de (H/C) en un rango de 1.3 a 2.0.

El término húmico se refiere a productos de turbas, principalmente material de plantas depositado en pantanos con presencia de oxígeno tabla.

La turba tiene un porcentaje de H/C de alrededor de 0.9, lo cual se puede corresponder con un importante productor de aceite. El material orgánico húmico es derivado de células de plantas el cual está compuesto principalmente de lignita y celulosa. La categoría húmica también incluye el

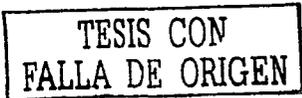
material orgánico carbonizado, así como también carbón vegetal y otras plantas oxidadas. El proceso de humificación es acelerado por la presencia de oxígeno y calor en climas tropicales. Cuando raíces y maderas de árboles son depositados en bosques pantanosos y sus correspondientes lagos, estos presentan cambios bacteriales y químicos que llevan hacia la formación de la turba. Mientras la turba se encuentra más profunda esta cambia con el tiempo y la temperatura (cualificación) a un color café (lignina) y finalmente antracita. Estos son los mayores carbones húmicos.

Si estas mismas partículas de raíces y maderas son llevadas hacia el mar y son depositadas en una cuenca sedimentaria, estas contribuirán a la parte húmica del kerógeno. Similar a esto, cualquier espora, polen o material de plancton transportado por viento o agua dentro del ambiente marino lacustre contribuye a la parte sapropélica del kerógeno, a menos que esta sea oxidada en su tránsito. Los tres mayores grupos macerales son en el carbón son:

- Liptinita. (También llamada exinita).
- Vitrinita
- Inetinita.

	Sapropélico		Húmico	
Grupos de carbón maceral	Liptinita (exinita)		Vitrinita	Inetinita
Crabón maceral	Algita		Telinita	Inertodetrinita
	Cerinita		Telocollinita	Escleotinita
	Esporinita		Desmocollinita	Macrinita
	Cutininita		Vitrodetrinita	
	Resinita			
	Lipodetrinita			
Tipos de Kerógeno	Fluorescentes		No florecente Amórf	
	I	II	III	IV
H/C	1.9 a 1.0	1.5 a 0.8	1.0 a 0.5	0.6 a 0.1
O/H	0.1 a 0.02	0.2 a 0.02	0.3 a 0.02	0.3 a 0.01
Fuentes	Marino, Lacustre, terrestre.		Terrestre y reciclado	

Tabla 4.11 Clasificación de la materia orgánica en carbón vegetal y rocas sedimentarias.



Los carbones húmicos usualmente contienen más del 70% de vitrinita. Las fuentes de los macerales están definidos por sus nombres, esto es alga, esporas, cutículas y resinas; que forman cuatro de los macerales.

La liptodetrinita representa la degradación de los otros macerales primarios enlistados, amorfo no es un maceral, pero describe toda la materia orgánica sin estructura y que puede ser sapropélica y húmica.

La cera es llamada cerinita es de origen terrestre, esta tiene el porcentaje más alto de H/C y a todos los constituyentes del carbón.

En el grupo de las vitrinitas, la telinita es el material celular de las plantas, y la colinita es la sustancia no estructural que llena las cavidades de la célula, de todas las intertinitas; la fisinita tiene el porcentaje de H/C más bajo.

La esclerotinita proviene de remanentes de hongos, y la macrinita es una masa amorfa sin estructura.

La inertoditrinita está compuesta por los restos de las otras inertinitas, aunque los macerales del carbón (tabla 4.11) son usualmente identificados en rocas sedimentarias con kerógeno amorfo no se encuentra bien definido en las rocas. El problema es que la degradación inicial de las bacterias sobre el kerógeno, además de su disolución y dispersión durante la sedimentación destruye la mayoría de las estructuras originales de la materia orgánica.

Es posible realizar alguna clasificación de los kerógenos amorfos revisando una muestra en el microscopio, usando las condiciones de iluminación mas conveniente, luz por transgresión, luz reflejada y luz ultravioleta. Esto permite reconocer cuatro tipos de kerógeno amorfo a y d basados en su producción aceite y los tipos b y c basados su producción en gas.

El término amorfo alguna vez fue erróneamente limitado a las liptinitas sapropélicas del kerógeno, las cuales son consideradas las mayores generadores de aceite. Pero ahora son reconocidas a lo largo de todos los kerógenos sapropélicos y húmicos. El kerógeno amorfo es potencialmente generador de aceite, florece debajo de la luz ultravioleta; el kerógeno amorfo no floreciente no tiene potencial para generar aceite. Los kerógenos que contienen el mayor material floreciente amorfo también tienen el porcentaje más alto de H/C, indicando un gran potencial para generar aceite; Lo anterior se representa en la gráfica 4.11.

**FALTA  
LAS  
PAGINAS**

**124**

**A**

**125**

## CAPITULO V. DIAGÉNESIS, CATAGÉNESIS Y METAGÉNESIS.

La transformación fisicoquímica de la materia orgánica, durante la historia geológica de las cuencas sedimentarias, no puede considerarse como un proceso aislado. Está controlado por los mismos factores principales que también determinan las variaciones de composición de la fase sólida inorgánica y del agua intersticial de los sedimentos: la actividad biológica en una etapa primaria, luego la temperatura y presión. Asimismo, la interacción orgánica-inorgánica puede presentarse en diferentes etapas de la evolución del sedimento. La naturaleza y abundancia de la materia orgánica puede resultar en un comportamiento diferente de la fase mineral, poco después del depósito; la composición de los minerales y la estructura de la roca pueden influir en la composición y distribución de las fases fluidas orgánicas a cierta profundidad. Para comprender esta discusión se clasifican tres etapas de evolución: Diagénesis, Catagénesis y Metagénesis, las cuales se describen en este capítulo.

El enterramiento del material orgánico empieza con su depositación, pero puede continuar largo tiempo después de haber cesado la acumulación de material orgánico en el fondo de la cuenca sedimentaria, esta es la función de la tasa de sedimentación posterior.

La transformación de un material orgánico en hidrocarburos comienza en los sedimentos en un ambiente reductor, el proceso de transformación requiere energía, y varias de las posibles fuentes de esta energía son: a) acción bacterial, b) calor y presión, y c) reacciones catalíticas.

Algunos de los procesos importantes en la formación del petróleo son:

- Procesos físicos posteriores al enterramiento. Se efectúan cambios en las condiciones físicas con el enterramiento, ya que hay aumento de la presión hidrostática con cada metro de cobertura añadida. Se ha determinado que la presión a una profundidad de 400 m es de 430 atmósferas. Otro aspecto se relaciona con la profundidad en sedimentos son enterrados a 4500 m, pueden estar sujetos a temperaturas de 150°C. El primer efecto físico sobre los sedimentos con materia orgánica como consecuencia del enterramiento y el peso del material depositado sobre ellos es su compactación. A causa de la naturaleza

del material, los sedimentos pueden llegar a ser comprimidos hasta el 50%, o más con relación a su espesor original y el peso específico de los sedimentos puede aumentar. Esta compresión va acompañada de la expulsión de un volumen igual de agua o de otro fluido.

- Cambios químicos posteriores al enterramiento. Aunque no es tan obvio como en los cambios físicos que se producen bajo la carga, la composición química de un sedimento orgánico cambia con el enterramiento; la mayor parte del cambio tiene lugar antes de que se haga notable el metamorfismo. El porcentaje relativo de volátiles disminuye y aumenta el del carbono fijo; en los carbones esta alteración química es la causa de sus diversas clases que van desde el lignito hasta la antracita, con el grafito como miembro extremo con el metamorfismo alcanzado. Entre los muchos agentes y procesos a los que se ha atribuido la transformación de la materia orgánica sólida en petróleo líquido, están la presión, las bacterias, los catalizadores y la temperatura (rompimiento termal o cracking). Por la acción de alta temperatura, los compuestos más pesados y complejos dan origen a moléculas más pequeñas por la ruptura de enlaces; obteniéndose compuestos con menor número de carbonos por lo tanto más ligeros.) la destilación natural y los minerales radiactivos, también pueden favorecer, la formación de aceite y/o gas; el tiempo geológico es también considerado como un factor importante. La presión, para ser efectiva, tendría que ser del orden de magnitud de la presión de cizallamiento para poder transformar la materia orgánica sólida en petróleo. Con relación a la temperatura, La presencia de porfirinas en petróleos crudos es una prueba positiva de que estos petróleos nunca pudieron estar a temperaturas altas, pues los compuestos de porfirinas no pueden existir por encima de los 200°C; existe también evidencia química que descarta una historia de temperaturas altas. Lo confirma el hecho de que los petróleos crudos profundamente enterrados en los sedimentos de la costa del Golfo de México no están a alta temperatura en la actualidad y no existe evidencia geológica de que lo estuvieran alguna vez. Este hecho hace insostenibles las teorías de la génesis del petróleo, basada únicamente en el

cracking natural y la hidrogenación, ya que estas reacciones exigen temperaturas más altas de 400°C.

Catálisis. El uso de arcilla en el cracking catalítico del petróleo crudo es un procedimiento normal en las refinerías petrolíferas, las reacciones del ión carbono (un radical de hidrocarburos) no exigen las altas temperaturas alcanzadas en el proceso industrial del cracking catalítico. Se interpreta que la evolución natural del petróleo es debida a la influencia de los silicatos ácidos que funcionan como catalizadores, estos se encuentran asociados al petróleo a lo largo de su historia de formación en el subsuelo. Los catalizadores naturales ayudan a explicar lo siguiente:

1. El complejo carácter y variedad de compuestos en el petróleo.
2. La ausencia de oleofinos
3. La formación de naftenos en cantidad.
4. La presencia de aromáticos. Su presencia no ha sido explicada en ninguna otra forma desde el momento en que no es posible una historia de temperaturas altas por la existencia de porfirinas en los petróleos crudos.
5. La formación de hidrocarburos ligeros incluyendo el metano.
6. Las diferencias en el carácter de los petróleos crudos debidas a las diferencias en los catalizadores presentes.
7. Los cambios de composición en el transcurso del tiempo geológico.

Los posibles argumentos que se oponen a la evolución mediante catálisis son: el petróleo está rara vez, o ninguna, en contacto real con la roca que lo encierra, a causa de una delgada película de agua que cubre las paredes de los poros; los catalizadores parecen ser menos efectivos cuando están húmedos que cuando están secos. Por lo tanto, la aceptación de la teoría catalítica en la evolución del petróleo incluye también la aceptación de que la actividad catalítica puede tener lugar aunque el catalizador se encuentre recubierto de una película de agua. Quizá la explicación es que la actividad demasiado lenta que ocurre en la Tierra no es posible representarla en el laboratorio en tiempo geológico. Se han sugerido cierto número de sustancias como posibles catalizadores en el proceso natural de refinación; se se han estudiado muestras donde se ha visto efecto polimerizante

de las rocas sedimentarias en Oklahoma, más algunos minerales, como la Trementina. Por regla general, las arcillas y lutitas encabezan la lista de catalizadores, entre los minerales arcillosos, la montmorillonita es muy activa y la caolinita no. La calcita pura y la dolomita no son catalíticas. Se ha considerado que algunas trazas de impurezas poseen una actividad catalítica muy alta.

- El tiempo geológico como factor en la generación de petróleo. Varios investigadores han demostrado que la formación de betumen a partir de materia carbonosa es una función de la temperatura, presión y tiempo. La teoría de que un moderado aumento en la temperatura produce los mismos resultados a lo largo del tiempo geológico que los conseguidos por una temperatura relativamente alta en unos pocos minutos, ha sido comparada al hecho conocido por todos los cocineros, de que, el tiempo suficiente a baja temperatura de horno puede llegar a asar tan enteramente como un horno caliente en poco tiempo. El concepto de tiempo es de considerable importancia en la teoría de evolución por catálisis del petróleo. Cuanto más tiempo este el petróleo en contacto con los materiales catalizadores, más evolucionará; las temperaturas más altas existentes a más profundidad pueden también acelerar la actividad catalítica. El hecho de que los petróleos más recientes comercialmente explotables son del Plioceno, es una prueba de la importancia del tiempo en la evolución del petróleo. En el tiempo de enterramiento de los sedimentos, la materia orgánica presente está generalmente en estado sólido, pero un pequeño porcentaje son hidrocarburos, probablemente residuos de proceso vitales, en forma de líquidos densos o semisólidos. Sin tener en cuenta el origen, el petróleo evoluciona mientras está en los yacimientos a través del tiempo geológico. El petróleo inicial es probablemente un material asfáltico semilíquido que evoluciona convirtiéndose por degradación térmica en un petróleo que contiene aceites más ligeros, parafinas y compuestos aromáticos. Esta evolución no puede ser provocada por temperaturas superiores a los 200°C, pues las porfirinas encontradas en petróleos crudos serían destruidas por encima de este nivel de temperatura. La teoría más aceptable para explicar la evolución natural del petróleo, es que

ciertos minerales como los silicatos ácidos, actuaron como catalizadores a lo largo del tiempo.

El conjunto de estos cambios físicos y químicos de la materia orgánica, así como la evolución natural del petróleo son explicados en los procesos de Diagénesis, Catagénesis y Metagénesis. A continuación se describen:

### **5.1 Diagénesis.**

Desde que se acumula la materia orgánica en un medio que favorece su preservación (ambiente reductor), y se va cubriendo por sepultamiento, experimenta una serie de cambios junto con los sedimentos que la contiene. Estos cambios comienzan en la etapa denominada diagénesis la cual se describe a continuación:

La Diagénesis es el proceso de alteración biológica, física y química de los fragmentos orgánicos que se encuentran en secuencias de grano fino debido al sepultamiento que sufren, la materia orgánica incluida en las arcillas se compacta y experimenta reacciones bastante complejas, uno de los principales agentes de la transformación durante la diagénesis temprana es la actividad microbiana; los microorganismos aeróbicos que viven en la capa superior de los sedimentos consumen el oxígeno libre mientras que los anaeróbicos reducen los sulfatos para obtener el oxígeno requerido, la energía se suministra a través de la descomposición de la materia orgánica, la cual durante el proceso se convierte en dióxido de carbono, amoníaco y agua; normalmente, la conversión se efectúa completamente en las arenas y parcialmente en los lodos.

La diagénesis es el proceso mediante el cual los biopolímeros (compuestos orgánicos constituyentes de los seres vivos, tales como carbohidratos, proteínas, etc.) son sometidos a un ataque básicamente microbiano, que se realiza a poca profundidad (con presiones litostáticas entre 0 y 300 bares) y bajas temperaturas (entre 0° y 50 °C). Este ataque origina la degradación de los biopolímeros (ácidos grasos, aminoácidos, etc.), estos bionómeros al ser sometidos a procesos de condensación y polimerización, se convierten en una serie de compuestos estructurados que reciben el nombre de geopolímeros, entre los cuales se encuentran los materiales de tipo húmico.

El mismo proceso que produce el metano en los pantanos, basureros, las plantaciones de arbustos, y los tractos digestivos de mamíferos ocurre continuamente dentro de los sedimentos enterrados someramente en los ambientes geológicos alrededor del globo.

Los procesos biogénéticos son capaces de producir inmensas cantidades de metano, se considera que son la fuente primaria del metano atrapada en las capas de siliciclastos dentro de las secuencias del subsuelo oceánico poco profundo.

El hidrocarburo generado durante esta etapa es el metano, asimismo, se produce también una serie de compuestos como el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{NH}_3$  y algunos compuestos heteroatómicos. El metano generado en esta fase recibe el nombre de biogénico o biológico, corresponde con gas seco y es producido por el proceso de descomposición de la materia orgánica. En esta etapa se presenta generalmente la consolidación del sedimento, es decir, las fracciones sueltas se convierten en rocas sedimentarias y la mayor parte de la materia orgánica que se conserva se transforma en kerógeno, que es la fracción insoluble y en menor proporción se forma betumen que corresponde a la parte soluble.

#### 5.1.2 Kerógeno.

El término kerógeno originalmente se refirió a la materia orgánica en arenas bituminosas que generaban aceite con base en calentamiento. Posteriormente, el término fue definido como toda la materia orgánica diseminada en rocas sedimentarias y que no es soluble en solventes orgánicos y ácidos.

El kerógeno en las rocas tiene cuatro principales fuentes: marina, lacustre, terrestre y reciclada, la mayoría del aceite del mundo se ha formado de kerógeno lacustre y marino; en donde existe más carbón, este es formado por plantas terrestres y el kerógeno reciclado es inerte.

La relativa habilidad de la roca generadora para producir petróleo está definida por su cantidad de kerógeno (TOC) y calidad (alto o bajo en hidrógeno). Si esta ha o no generado petróleo es definido por su estado de maduración (inmaduro, maduro, o sobremaduro con respecto al aceite).

El kerógeno es una estructura policondensada que se forma en condiciones moderadas de temperatura y presión de los sedimentos jóvenes y metaestables como consecuencia parece ser que sus características permanecen más bien constantes, aún en los sedimentos antiguos, siempre y cuando no se encuentren sepultados a gran profundidad.

El kerógeno está formado por macromoléculas de núcleos cíclicos condensados por enlaces heteroatómicos o cadenas alifáticas, por lo que es resistente a la descomposición. Se compone de fragmentos orgánicos diseminados, que pueden agruparse en unidades llamadas macerales, los cuales se clasifican en:

- Vitrinita. Principal tipo en muchos kerógenos, y principal componente del carbón. Aparece en casi cualquier medio deposicional.
- Exinita. Derivado de algas, esporas, polen y ceras. No es muy común. Indica un medio lacustre o marino somero.
- Inertita. Proviene de varias fuentes de materia orgánica que han sido muy oxidadas durante la deposición.
- Amorfinita: es un componente de los macerales e incluye todos los componentes amorfos. Son los componentes más interesantes de cara a la formación de petróleo, pues, al estar mas machacados, madura a menores temperaturas.

La diferenciación de los carbones se realiza fundamentalmente con estudios en microscopio, debido a la opacidad de los materiales que contienen, se realiza la observación mediante un microscopio de luz reflejada. Los colores que se observan son colores entre blancos, grises y negros.

La preparación de las muestras es complicada ya que exige un tallado de las muestras muy preciso así como su inclusión en una resina.

A continuación en la figura 5.1 se exponen algunos ejemplos de macerales al microscopio de las variedades más comunes:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Figura 5.1 Ejemplos de Macerales, tomada de la página; [www.members.fortunecity.com](http://www.members.fortunecity.com)

La clasificación de los kerógenos puede realizarse basándose en diferentes tipos de estudios como son los palinológicos, petrográficos y los geoquímicas. Los términos para clasificar los carbones (saptopélico y húmico), pueden ser empleados también en los kerógenos.

- Saptopélico. Se refiere al producto obtenido de la descomposición y la polimerización de la materia algácea y herbácea principalmente, depositada en condiciones acuáticas con bajo contenido de oxígeno atmosférico. Los kerógenos saptopélicos producen aceite mediante el calor.
- Húmico. Se aplicará al producto obtenido de la descomposición de plantas terrestres superiores, depositados en medios terrígenos con abundante oxígeno atmosférico. Los kerógenos húmicos producen principalmente gas.

El análisis del tipo de kerógeno sirve para determinar la calidad y el tipo de hidrocarburo que puede generar, en función de establecer las relaciones atómicas

H/O y O/C. En función de estas relaciones, de su origen y composición se puede dividir en cuatro tipos: Tipo I, II, III, y IV.

### 5.1.3 Tipos de kerógeno.

- Kerógeno tipo I. es el kerógeno que tiene alta relación atómica H/C inicial (cerca de 1.5 o mas), con una baja relación O/C inicial (generalmente menor de 0.1); se compone de gran cantidad de material lípido, particularmente cadenas alifáticas; el contenido de los núcleos poliarométicos y enlaces heteroatómicos es bajo comparado con otros tipos de materia orgánica. Cuando se somete en laboratorio a pirólisis ( $550^{\circ}$ - $600^{\circ}$ C), produce un alto rendimiento de compuestos volátiles mucho mayor que cualquier otro tipo de kerógeno (hasta 80% en peso para las muestras inmaduras de poca profundidad) y de manera similar, un alto rendimiento de aceites saturados. Es un kerógeno poco común y probablemente es derivado de productos algáceos, de una biomasa de lípidos retransformados y de otros lípidos microbiales. Deriva de materia orgánica que se acumuló en medios marinos, con excelente calidad de materia orgánica y gran potencial generador de hidrocarburos líquidos. Se trata de un kerógeno difícil de encontrar.

- Kerógeno tipo II. Se encuentra relacionado con los sedimentos marinos en donde se deposita la materia orgánica autóctona y la transportada derivada de una mezcla de fitoplancton, zooplancton, microorganismos (bacterias), plantas y animales superiores que se acumularon en un medio ambiente reductor. Presenta menor rendimiento en la pirólisis que el de tipo I, aunque es más frecuente en muchas rocas generadoras y en lutitas aceítíferas; tiene relaciones H/C relativamente altas y O/C bajas. Los núcleos poliaromáticos y los grupos heteroatómicos (cetona y carboxílico), son más importantes en comparación con el tipo I, pero menos que el tipo II. En la Catagénesis este tipo de kerógeno produce aceite y gas; el azufre se encuentra presente en cantidades notables. Corresponde a medios marinos, pero con una menor cantidad de materia orgánica o bien representativa de una mezcla de material continental, marino y lacustre. El potencial generador es inferior al de las muestras de kerógeno tipo I, sin embargo es el más común y es el responsable de la generación de la mayor

parte de los aceites producidos que se encuentran los yacimientos de hidrocarburos del mundo. El kerógeno tipo II es el que da como resultado hidrocarburos líquidos ricos en aromáticos, naftenos y n-alcenos.

- Kerógeno tipo III. Se refiere al kerógeno con relación H/C inicial relativamente baja (normalmente menos de 1.0) y una relación atómica O/C inicial alta (0.2 o 0.3), está compuesto por una proporción importante de núcleos poliaromáticos y grupos heteroatómicos (cetona y ácido carboxílico), además por algunas cadenas largas que se han originado en las ceras de plantas superiores, por lo que es rico en vitrinita. Este tipo es menos favorable para la generación de hidrocarburos líquidos que los otros dos, produce generalmente carbón o gas, es menos productivo durante la pirólisis. Son característicos de material de tipo eminentemente continental, o bien marinos o lacustres, pero sometido a una fuerte oxidación.

- Kerógeno tipo IV. Se refiere a materia orgánica rica en inertita, por lo que no produce ni aceite ni gas. Este tipo de kerógeno no es importante en la generación de hidrocarburos.

En la tabla 5.1 se representan los diferentes tipos de kerógeno, su porcentaje en cuanto a H/C y O/H, así como sus enlaces y generación de hidrocarburos con respecto al tipo de materia orgánica.

Se observa que para el kerógeno tipo I tiene gran cantidad de materia orgánica de tipo algal con cantidades de H/C de 1.65 y O/C de 0.06 y es productor aceite. Para el hidrocarburo tipo II se observa que tiene valores de H/C de 1.28, para O/C de 0.10, productor de aceite y gas y para el kerógeno tipo III valores de H/C 0.84, para O/C 0.13, siendo productos de gas.

#### 5.1.4 Química del kerógeno.

Químicamente el kerógeno consiste en carbón, hidrógeno, y oxígeno, con pequeñas porciones de nitrógeno y sulfuro. (Figura 5.2)

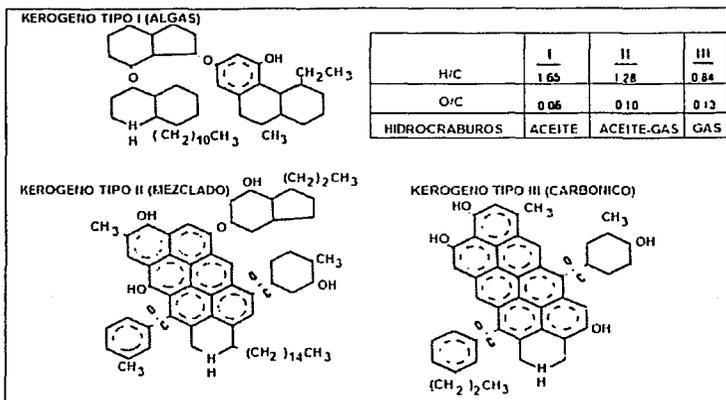
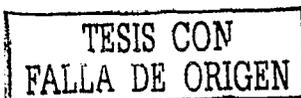


Figura 5.2 Diferentes tipos de Kerógeno. (Tomada de Tissot 1978).

QUIMICA DEL KEROGENO							
	Porcentaje de peso				Radios		Tipos de Petróleo
	Carbon	Hidrógeno	Nitrógeno	Azufre	H-C	O-C	
TIPO I alga	75.9 7 muestras	8.84	1.97	2.7	1.65	0.06	Aceite
TIPO II lipnítico	77.6 6 muestras	10.5	2.15	2.7	1.28	0.1	Aceite y gas
TIPO III húmico	82.6 3 muestras		2.1	0.1	0.84	0.13	Gas

Tabla 5.1 Principales compuestos del Kerógeno. (Tomada de Tissot y Welte 1978).

La maduración del kerógeno puede ser medida con muchas técnicas, el porcentaje de maduración puede ser función de la temperatura, tiempo, y presión. La generación de aceite volumétricamente más importante de ocurre entre 60 y 120°C, y la generación de gas volumétricamente más importante ocurre entre 120 y 225°C, cerca de los 225°C el kerógeno es inerte, habiendo expelido todos los hidrocarburos, solamente el carbono residual puede posteriormente convertirse en grafito. En la figura 5.3 muestra la evolución del aceite en una ventana líquida de entre 65 y 150°C, la cual se extiende desde profundidades con gradientes termales altos hasta cuencas profundas con gradientes bajos.



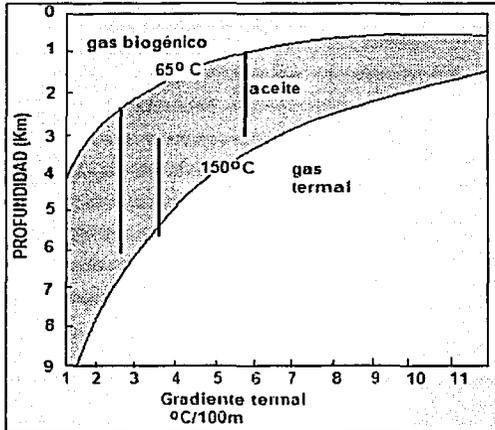


Figura 5.3 Evolución del aceite en una representación de profundidad contra gradiente termal. Tomada de Hunt, 1996

### 5.1.5 Reflectancia de la vitrinita (%/Ro)

El uso de la reflectancia de la vitrinita como una técnica para determinar la maduración de la materia orgánica en rocas sedimentarias es muy útil. Hoy en día la reflectancia de la vitrinita es el indicador del esfuerzo termal mayormente usado, porque este comprende un rango mas grande de maduración que cualquier otro indicador, esto da como resultado que los investigadores puedan realizar un gran numero de análisis en un relativo tiempo corto.

La vitrinita incluye la telinita que es el material de la pared celular de las plantas y la colinita que es la sustancia orgánica que llena las cavidades celulares. La reflectancia de luz en una superficie pulida de vitrinita se incrementa con una alta maduración debido al cambio en su estructura molecular del maceral.

La vitrinita está compuesta de paquetes de anillos aromáticos condensados unidos con cadenas y colocados unos sobre otros. Cuando la maduración se incrementa, los paquetes se fusionan en estructuras mas grandes. Eventualmente estos

forman hojas de aros condensados que asumen una estructura ordenada. El incremento en el tamaño de estas hojas y su orientación causan gran reflectividad. Las reacciones químicas en donde el porcentaje se eleva exponencialmente con la temperatura son responsables de los cambios en la estructura molecular. Consecuentemente, cualquier medida de reflectancia de estos cambios de maduración también se incrementa exponencialmente con una elevación lineal en su temperatura. Las medidas de la reflectancia solo deben hacerse en grupos vitriniticos de macerales ya que la maduración de los otros macerales ocurre en distintos grados. Con un contenido de carbón de 88% la reflectancia fluctua alrededor del 0.55%, de lignita hasta 1.7%, de inertinita y 1.2% de vitrinita. También existe un máximo y un mínimo de reflectividad en la vitrinita, la cual es medida con luz polarizada.

La reflectancia del kerógeno es generalmente poco uniforme, dependiendo del tipo de partícula orgánica: cerca de 0.5% o menos en la vitrinita y menor en la exinita. La figura 5.4 muestra un ejemplo de variación regional en la maduración de materia orgánica en relación a una estructura geológica. El aceite es inmaduro en las paredes A ,B y en la ventana C es maduro, representa la relación de los valores de  $R_o$  (valor de índice de Reflectancia de la vitrinita) los cuales indican cuando se ha entrado a la ventana de generación, los cuales son: de 0.2 a 0.5 con profundidades que se observan de 1500 a 3200m.

La diagénesis incluye todos los procesos físicos y químicos que afectan al sedimento después del depósito y hasta antes del metamorfismo de bajo grado. (figura 5.4) los procesos diagenéticos no operan con uniformidad ni regularidad, por lo que el tiempo y edad geológica de las rocas o sedimentos no son factores cruciales en los productos de la diagénesis. Por tanto, si se tiene el mismo grado de litificación no implica la misma historia depositacional para los dos.

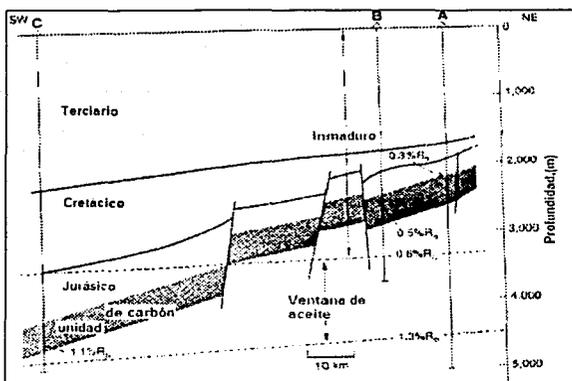


Figura 5.4 Ejemplo de valores de reflectancia de la vitrinita en relación con el kerógeno. (Tomada de Hunt, 1996).

El tema de la diagénesis temprana se puede tratar a tres niveles:

1. Generalizaciones cualitativas basadas en tendencias con la porosidad observadas en sedimentos naturales.
2. Predicciones cualitativas basadas en mediciones de laboratorio y cálculos termodinámicos.
3. El tercer nivel (más complejo) es la descripción cuantitativa y la predicción basada en mediciones de tasas de reacción y su relación entre ellas en términos de expresiones teóricas de tasas de reacción.

El énfasis será puesto en la composición química del agua intersticial de los sedimentos debido a las siguientes dos razones:

1. Las aguas intersticiales son indicadores muy sensitivos de cambios diagenéticos incipientes en los sólidos. Por ejemplo un 20% de incremento en la concentración de Ca disuelto de carbonato de calcio, el cual puede ser medido fácilmente, es aproximadamente equivalente a una disminución de únicamente 0.02% en el  $\text{CaCO}_3$  en peso.

2. Los énfasis químicos de soluciones intersticiales son generalmente más fáciles, y su interpretación menos ambigua, que los análisis químicos en los sedimentos sólidos.
3. b) Diagénesis Tardía: Los eventos posteriores son mas lentos y de menor duración

El final de la diagénesis de la materia orgánica sedimentaria se sitúa en la forma más conveniente al nivel en que los ácidos húmicos extraíbles han disminuido hasta una cantidad menor, y en donde la mayor parte de los grupos carboxilo han sido eliminados. Esto es equivalente al límite entre el carbón café y el carbón duro, de acuerdo con la clasificación de carbón, según el Manual Internacional de Petrología del carbón (1971). Corresponde a una reflectancia de vitrinita cercana a 0.5%.

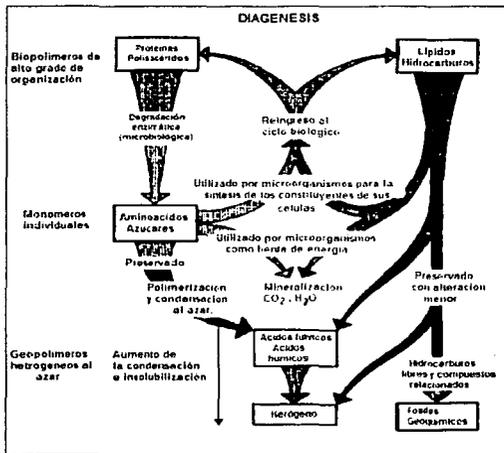


Figura 5.5 Representación esquemática de la Diagénesis (tomada de Tissot, 1978).



## 5.2 Catagénesis.

El depósito consecutivo de los sedimentos tiene como resultado el entierro más profundo de los lechos previos, a una profundidad que alcanza varios kilómetros de recubrimiento en cuencas subsidentes. Esto representa un aumento considerable en la temperatura y presión. Los movimientos tectónicos también pueden contribuir a este aumento, para esta etapa de la evolución sedimentaria Tissot,(1978) sugiere el término Catagénesis propuesta por Vassoevich (1957), que también ha sido utilizada por Strakhov (1962). Cuyas principales características se describen a continuación:

En esta etapa la temperatura puede variar desde, aproximadamente, 50 hasta 150°C, y la presión debida a la sobrecarga puede ser de 300 a 1000 o 1500 bars. Tal aumento coloca nuevamente al sistema fuera de equilibrio, y da como resultado nuevos cambios. La composición y textura de las fases minerales se conservan con algunos cambios, que principalmente se realizan en la fracción de arcilla. La principal modificación inorgánica aún se refiere a la compactación de la roca: el agua continúa siendo expulsada, la porosidad y permeabilidad disminuyen de manera notable; la salinidad normal del agua intersticial aumenta y puede llegar cerca de la saturación.

La materia orgánica experimenta cambios mayores a través de evolución progresiva, el kerógeno produce principalmente petróleo líquido; luego, en una etapa subsecuente, se obtiene el "gas húmedo" y condensado; tanto el aceite líquido como el condensado van acompañados de una cantidad considerable de metano. Los depósitos orgánicos masivos, progresan a través de diversas clases de carbón y también producen hidrocarburos, principalmente metano.

El final de la Catagénesis se alcanza en el intervalo donde se completa la desaparición de las cadenas alifáticas de carbono en el kerógeno, y en donde se inicia el desarrollo de un ordenamiento de unidades básicas de kerógeno. Esto corresponde a una reflectancia vitrinita de aproximadamente 2.0, que de acuerdo con las diversas clasificaciones del carbón, es cercana al principio de las clases de antracita. Ya que hay severos cambios en el material orgánico, y puesto que con la evolución adicional no hay más generación de petróleo, y tan sólo cantidades

limitadas de metano, este punto parece corresponder a un corte natural. En consecuencia se establece un límite en donde termina la Catagénesis y con la cual se inicia la etapa posterior, denominada Metagénesis.

Conforme la temperatura continúa aumentando, se rompen más y más enlaces, por ejemplo, los enlaces de éter y algunos C – C. Las moléculas de hidrocarburos, particularmente las cadenas alifáticas, se producen a partir del kerógeno y de los compuestos N,S,O previamente generados. Algunos de los hidrocarburos liberados son moléculas biogénicas C<sub>15</sub> a C<sub>30</sub>, comparables con los fósiles geoquímicas que fueron anteriormente entrampados en la matriz del kerógeno o unidos por medio de enlaces éster. Sin embargo, la mayor parte de los nuevos hidrocarburos producidos durante la zona principal de generación de aceite tienen peso molecular intermedio a bajo. No disponen de una estructura característica o distribución específica, lo cual es contrario a los fósiles geoquímicas, que progresivamente se diluyen por estos nuevos hidrocarburos. Esto constituye la etapa principal de formación de aceites. No obstante la generación de aceite líquido va acompañada de la formación de una cantidad significativa de gas.

A los 60°C empieza la generación principal de hidrocarburos líquidos, los cuales son pesados y ricos en nitrógeno, azufre y nitrógeno. Con el incremento de temperatura los aceites se van haciendo sucesivamente más ligeros; a los 100°C, se produce la máxima generación, por encima de los 100°C, la generación disminuye y se forman hidrocarburos condensados y gases. La ventana de generación de hidrocarburos líquidos se cierra a los 175°C y se caracteriza por un índice de reflectancia de 0.5 y 2.0; es importante señalar que la generación directa desde el kerógeno termina en los 225°C. La historia de la formación del petróleo se resume como al función del sepultamiento creciente de la roca generadora, en la figura 5.6 se representa la abundancia y composición de los hidrocarburos generados.

La evolución de la composición de los hidrocarburos se muestra en las inserciones para tres tipos estructurales. Las profundidades solo son indicativas, y corresponden a un promedio en las rocas generadoras del Mesozoico y

Paleozoico; las profundidades reales varían de acuerdo con las condiciones geológicas.

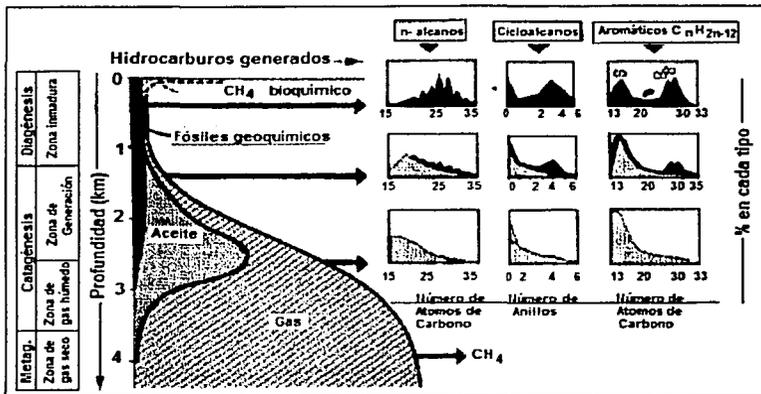


Figura 5.6 Esquema general de la formación de hidrocarburos como función del sepultamiento de la roca generadora. Tomada de Tissot (1978).

El proceso de catagénesis la temperatura juega un papel muy importante, por lo que se pueden también realizar divisiones que nos indican los cambios que experimenta la materia orgánica por el incremento del gradiente geotérmico (figura 5.7).

A los 60° C empieza la generación principal de hidrocarburos líquidos, los cuales son pesados y ricos en Nitrógeno, Azufre y Oxígeno (figura 5.8). A medida que la temperatura y sepultamiento continúan aumentando, la ruptura de enlaces carbono-carbono se presenta con más frecuencia, y altera a los hidrocarburos de la roca generadora ya formados, así como al Kerógeno remanente. Los hidrocarburos ligeros se generan a través de esta desintegración y su proporción aumenta rápidamente en los hidrocarburos de la roca generadora y el petróleo.

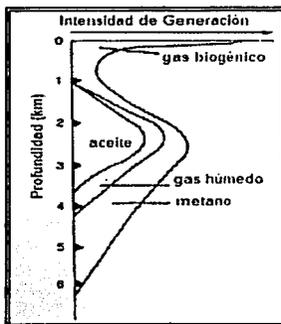


Figura 5.7. Generación de hidrocarburos en relación a la profundidad de sepultamiento (tomado de Berkowitz, 1997).

Debido a la cinética de la formación y a la estructura avanzada del kerógeno, el metano se convierte rápidamente en el compuesto predominante liberado. La transformación global que se presenta durante la catagénesis en el compuesto predominante liberado. La transformación global que se presenta durante la Catagénesis es equivalente al proceso de desproporción.

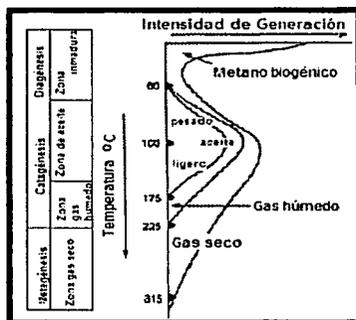


Figura 5.8 Generación de aceite y gas en función del incremento de temperatura (Tomado de Hunt, 1996).

Por una parte, se generan hidrocarburos de contenido de hidrógeno creciente, la relación atómica H/C promedio es de 1.5 a 2.0 en el crudo, y 4.0 en el metano puro. Por otra parte, el kerógeno residual llega a ser agotado en hidrógeno con una relación atómica H/C de, aproximadamente, 0.5 hacia el final de la etapa de Catagénesis.

### 5.3 Metagénesis y Metamorfismo.

La última etapa de la evolución de los sedimentos, conocida como metamorfismo, se alcanza en depresiones profundas, aquí la temperatura y presión alcanzan valores altos; asimismo, las rocas se encuentran expuestas a la influencia del magma y efectos hidrotérmicos. Sin embargo, la geología del petróleo solamente está interesada en la etapa precursora al metamorfismo. Lo que se refiere a constituyentes orgánicos, se refiere a esta etapa que precede al metamorfismo como Metagénesis de la materia orgánica. Los minerales se transforman severamente bajo tales condiciones: los minerales de arcilla pierden el agua de entre sus capas y alcanzan un alto grado de cristalinidad; los óxidos sin agua (hematina), etc.; tienen lugar severas disoluciones y recristalizaciones a presión, como la formación de la cuarcita, y se puede tener como resultado la desaparición de la estructura original de la roca. La roca alcanza condiciones de temperatura que originan Metagénesis de la materia orgánica. En la figura 5.9 se representa las etapas sucesivas de Diagénesis, Catagénesis y Metagénesis para el logro de un equilibrio termodinámico, con una línea continua se muestran los valores aproximados de reflectancia vitrinita, con una línea punteada los límites del campo de kerógeno y con flechas las trayectorias de evolución de los principales tipos de kerógeno. En la etapa de metagénesis, la materia orgánica esta formada, tan solo, de metano y un residuo de carbón en donde se empieza a desarrollar cierto ordenamiento cristalino; los carbones se transforman en antracita. Las verdaderas condiciones del metamorfismo dan como resultado esquistos verdes, roca metamórfica laminada, o sea, un desarrollo de facies anfibolítica.

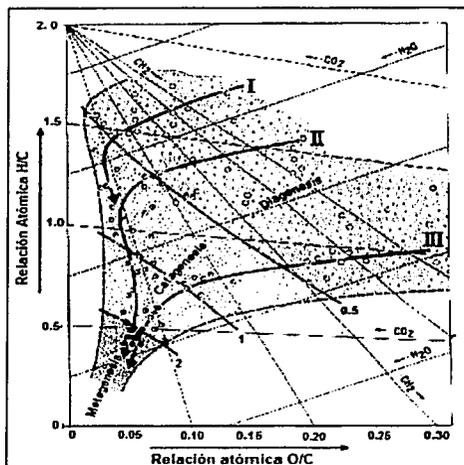


Figura 5.9 Esquema general de la evolución del Kerógeno, desde la diagénesis hasta la Metagénesis, en el diagrama de Van Krevelen, (Tomada de Tissot, 1978).

El carbón se transforma en meta antracita, la cual tiene una reflectancia vitrinita mayor de 4%. Los constituyentes del kerógeno residual se transforman en grafito. La Metagénesis está considerada como el inicio del metamorfismo. Esta se desarrolla a temperaturas mayores de 225°C, y es la última etapa de transformación de la materia orgánica considerada importante para la generación de gas. La generación del metano acaba a los 315°C, con profundidades cercanas a los 8Km, es decir, presiones litostáticas mayores a 1500 bares. La porosidad de las rocas en estas condiciones disminuye notablemente, por lo que es difícil que se formen a estas profundidades yacimientos de hidrocarburos que tengan rendimiento económico.

# FALTA LAS PAGINAS

**147**

**A**

**148**

**CAPITULO VI CLASIFICACION DE LOS ACEITES CRUDOS, EL GAS NATURAL Y LOS HIDRATOS DE METANO.**

La excepcional importancia de la química orgánica en diversos aspectos de la vida moderna, queda demostrada considerando algunos de los tipos de compuestos orgánicos que se conocen y que son de gran utilidad en la sociedad. El petróleo y/o gas son una mezcla complicada de compuestos de carbono e hidrogeno, que son llamados, por lo tanto, hidrocarburos. Hace pocas décadas, del aceite crudo sacado de los pozos, se separó por destilación una fracción suficiente volátil para ser empleada como combustible en los motores de explosión interna, y una fracción de más alto punto de ebullición, que se usaba en lámparas de petróleo. Pero la investigación química llegó a descubrir métodos para transformar los hidrocarburos originales del petróleo en otros de propiedades muy superiores, de modo que se obtiene hoy del petróleo gasolina con rendimiento y además mejor calidad, requerida por los motores actuales de automóviles y de aviación. Por procesos de transformación y de síntesis, se obtienen combustibles adecuados a las necesidades de los motores Diesel y de reacción. La tecnología del petróleo ha proporcionado, además, compuestos químicos que sirven como intermedios para la obtención de productos de gran interés, tales como cauchos sintéticos, plásticos y detergentes.

Los hidrocarburos contenidos en el petróleo corresponden a una serie de productos cuyo primer compuesto es el metano, de fórmula empírica  $\text{CH}_4$ , el cual es el principal componente del gas natural. Un amplio grupo de compuestos orgánicos, se puede relacionar con hidrocarburos de la familia del metano. Otro extenso grupo incluye compuestos derivados del benceno de fórmula  $\text{C}_6\text{H}_6$ . El benceno y los hidrocarburos que con él tienen relación, resultan como subproductos junto con la hulla y el coque. Si se calienta la hulla a elevada temperatura, da un residuo de coque, gas que se usa para alumbrado, (gas de hulla) y una fracción que destila y después condensa, dando el alquitrán (alquitrán de hulla). La redestilación del alquitrán suministra una serie de hidrocarburos aromáticos, como benceno ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ) y el naftaleno ( $\text{C}_{10}\text{H}_8$ ); algunos de estos

compuestos tienen olor agradable. Estos hidrocarburos son el punto de partida para la obtención de colorantes sintéticos, plásticos, insecticidas (DDT), sulfamidas y otras drogas.

La clasificación de hidrocarburos que utilizan los geólogos y geoquímicos, está definida y caracterizada por la relación que guardan con la roca generadora y el grado de evolución; por lo tanto se basan en información química y estructural de los constituyentes de los crudos.

Para lograr una mejor comprensión, es necesario recordar los siguientes conceptos de química orgánica (conceptos clave):

- Acetileno: primer homólogo de la serie de los alquinos,  $C_2H_2$  su nombre es etileno.
- Aditivo: hidrocarburo saturado de cadena abierta de fórmula general  $C_nH_{2n+2}$ .
- Areno: derivado del benceno en el cual un grupo alquilo substituye al hidrógeno; por ejemplo el alquilbenceno.
- Aromaticidad: tipo especial de instauración que poseen los compuestos aromáticos.
- Craqueo: proceso que se emplea en la refinación del petróleo, en el cual los alcanos de cadena larga se fragmentan en alcanos y alquenos de cadena más corta.
- Cicloalcano: hidrocarburo saturado formado por una cadena cerrada o anillo de átomos de carbono, su fórmula general es  $C_nH_{2n}$ .
- Compuesto aromático: hidrocarburo cíclico insaturado en el cual el anillo en esencia es plano, con una fuerte superposición  $\pi$  en torno al anillo y con los orbitales  $p$  en fase; contiene  $4n + 2$  electrones  $\pi$ .
- Compuesto heterocíclico: compuesto cíclico que contiene uno o más átomos de elementos diferentes al del carbono en el anillo.
- Destilación fraccionada: procedimiento de destilación en que se obtienen fracciones con niveles diferentes de punto de ebullición. Se emplea en la refinación del petróleo.
- Deslocalización de la carga: desplazamiento de la densidad de la nube electrónica de modo que la carga quede dispersa en un área grande; incrementa

la estabilidad de las especies.

- Energía de resonancia: cantidad con la que se reduce la energía potencial de un compuesto debido a la deslocalización de sus electrones pi mediante la hibridación de dos o más formas electrónicas posibles del compuesto.
- Enlace: fuerza atractiva que existe entre distintos átomos, suficientemente intensa para permitir que el agregado funcione como una unidad. Todos los enlaces se originan por las cargas electrostáticas de los electrones y los núcleos atómicos.
- Enlace sencillo: es la forma más simple de unión que puede tener lugar entre dos átomos monovalentes. El enlace está formado por la unión de dos electrones, uno de cada átomo.
- Gasolina: mezcla de hidrocarburos saturados, con 5 a 12 átomos de carbono en la molécula; hierve entre los 25 y 200° C.
- Gasolina con plomo: gasolina a la cual se ha añadido tetraetilo o tetrametilo de plomo para incrementar su octanaje y mejorar su rendimiento.
- Halogenación: sustitución de uno o más átomos de halógeno por uno o más átomos de hidrogeno de un alcano.
- Modelo compacto: modelo que representa la superposición de orbitales moleculares (nubes electrónicas) en el espacio, así como la geometría de la molécula.
- Modelo de barras y esferas: modelo en que se emplean esferas para los átomos y barras para los enlaces que mantienen unidos a los átomos en una molécula. Las longitudes de enlace no se representan a escala y los ángulos de enlace son aproximadamente correctos. Este modelo muestra que los átomos se hallan unidos.
- Modelos moleculares estructurales: modelos que representan a los enlaces, a los ángulos de enlace y las longitudes de enlace aproximadas en las moléculas; no describen el espacio que ocupan los orbitales.
- Octanaje: evaluación del rendimiento de una gasolina en motores de combustión interna de alta compresión.
- Orbital circular pi: orbital pi de enlace formado por superposición lateral de los orbitales 2p de los átomos de carbono adyacentes del anillo bencénico; una fase

se encuentra por encima del plano del anillo, y la otra se halla por debajo del plano del anillo.

- Orbital híbrido sp: orbital que resulta de la hibridación de un electrón s y un electrón p.
- Orbital o enlace pi: orbital molecular que consta de un par de electrones p apareados y compartidos. Forma el segundo enlace del doble carbono, se genera por superposición lateral de dos orbitales atómicos.
- Orbital molecular pi: tipo de orbital molecular que se forma por superposición lateral (paralela a los ejes de los orbitales) de orbitales atómicos; el tipo más común es el que se forma por superposición de orbitales p.
- Orbital molecular sigma: tipo de orbital molecular que se forma por superposición frontal (coaxial) de orbitales atómicos de todo tipo. Es de forma elipsoidal.
- Oxidación: reacción en la cual un reactivo experimenta un incremento en su estado de oxidación por pérdida parcial o completa de electrones; ocurre la pérdida de hidrógeno, corresponde con la pérdida de electrones (oxidación) en química orgánica.
- Parafinas: nombre que inicialmente se dio a los alcanos; significa "poca afinidad".
- Pirólisis: método de descomposición en el cual las fracciones del petróleo se calientan cerca de los 600° C.
- Polímero: molécula muy grande formada por unidades repetitivas.
- Radical libre primario: radical libre en el cual el electrón desapareado se encuentra en un átomo de carbono enlazado a otro átomo de carbono enlazado a otro átomo de carbono. Es menos estable que un radical libre secundario o terciario, pero más estable que un radical libre metilo.
- Radical libre secundario: radical libre en el cual el electrón desapareado se encuentra en un átomo de carbono unido a otros dos átomos de carbono. Es menos estable que un radical libre terciario, pero más estable que uno primario.
- Radical libre terciario: radical libre en el que el electrón desapareado se halla en un átomo de carbono unido a otros tres átomos de carbono. Es más estable

que un radical libre secundario o uno primario.

- Reacción de iniciación de la cadena: reacción necesaria para iniciar una reacción en cadena.
- Reacción en cadena: reacción de etapas múltiples en que se regenera uno de los reactivos necesarios; se propaga por sí misma.
- Reacciones de apertura de anillo: reacciones del ciclobutano y el ciclopropano con ciertos reactivos para dar butano, propano, o sus derivados.
- Reacciones de propagación de la cadena: reacciones intermedias de una reacción en cadena; para mantener la reacción en marcha.
- Reacciones de terminación de la cadena: reacciones entre los radicales libres intermediarios de reacción; tienden a detener una reacción en cadena antes que llegue a ser completa.
- Reducción: reacción en la cual un reactivo experimenta disminución en su estado de oxidación por ganancia parcial o total de los electrones. La ganancia de hidrógeno por un compuesto es un tipo común de ganancia de electrones (reducción) en química orgánica.
- Valencia: número entero que representa o denota el poder de combinación de un elemento con otro.

### 6.1 Clasificación de los Hidrocarburos.

Los hidrocarburos se pueden clasificar de varias formas, las clasificaciones más comunes son las siguientes:

De acuerdo a su arreglo estructural (de los átomos de carbono en la molécula) pueden ser:

- De cadena abierta o lineal.
- De cadena cerrada o cíclica o de anillo.

De acuerdo al tipo de enlace entre los átomos de carbono en la molécula, pueden ser:

- De enlace sencillo.
- De enlace (doble o triple).

Los hidrocarburos se clasifican en dos grandes grupos:

Grupo 1: Hidrocarburos Saturados

Grupo 2: Hidrocarburos Insaturados.

### 6.1.2 Hidrocarburos Saturados.

Los hidrocarburos saturados reciben este nombre debido a que no reaccionan con el hidrógeno. Cada átomo de carbono de un hidrocarburo saturado posee cuatro enlaces covalentes simples constituidos por orbitales híbridos  $sp^3$ , unidos ya sea por átomos de hidrógeno o a átomos de carbono. Los ángulos de enlace son de  $109^\circ 28'$ , o sea, forman tetraedros.

Resulta posible la rotación en torno a los enlaces covalentes carbono-carbono y esto genera una variedad de conformaciones no aislables.

Las conformaciones existen como una mezcla en equilibrio y dan lugar a las propiedades observadas de cada alcano. Los isómeros de cadena o esqueleto van incrementándose conforme aumenta el número de átomos de carbono de la molécula. En la figura 6.1 se representa la estructura y características del etano, como ejemplo de hidrocarburo saturado.

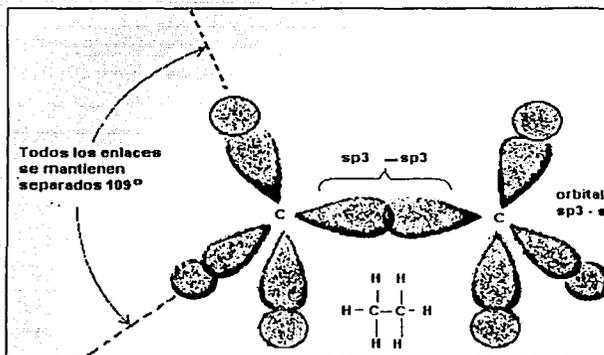


Figura 6.1 Representación esquemática del etano.

Los alcanos (cadena abierta) y Naftenos (cadena cerrada) forman los hidrocarburos saturados. Son importantes como disolventes, combustibles y

materias primas y también constituyen el esqueleto de los demás compuestos orgánicos. En la figura 6.2 se muestra la clasificación general de los hidrocarburos saturados.

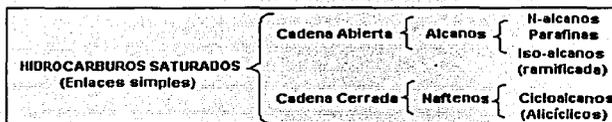


Figura 6.2 Clasificación de los Hidrocarburos Saturados.

### 6.1.3 Alcanos. (Cadena Abierta).

Los alcanos tienen la forma general  $C_nH_{2n+2}$ , donde  $n$  es el número de átomos de carbono. De manera inicial se les llamó parafinas, término que significa poca afinidad; y recibieron este nombre debido a que en general no reaccionan con ácidos, bases, ni agentes oxidantes, ni tampoco con agentes reductores ya que se encuentran en estado muy reducido. La fuente principal de los alcanos es el petróleo, otras fuentes son la hulla, el aceite de lutita y una reacción de monóxido de carbono e hidrógeno a presión elevada. Las principales reacciones de los alcanos incluyen oxidación, con oxígeno como la combustión o con halógeno como en la sustitución de hidrógeno por halógeno. El producto principal de la combustión de los alcanos es calefacción para los hogares, la industria y la producción de energía eléctrica y automotores.

Nomenclatura de los hidrocarburos saturados.

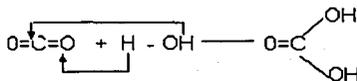
- El nombre de alcano de que tiene cadenas continuas que pueden ser más largas, se utiliza como nombre principal para todos los compuestos alifáticos (alcanos y sus derivados).
- Un alcano de cadena ramificada (iso-alcenos) se denomina derivado de su alcano principal (cadena continua más larga de átomos de carbono).
- Las posiciones de las ramificaciones en el alcano principal se indican mediante números de ubicación.
- La numeración de la cadena continua más larga de carbono debe ser tal que

los números de ubicación sean los más pequeños.

- Si la misma ramificación aparece dos o más veces, se emplea un prefijo adecuado (por ejemplo, di, tri, tetra o penta) para designar el número de ramificaciones iguales, y se emplean los números de ubicación apropiados a fin de dar las posiciones de las ramificaciones.
- Si dos o más grupos alquilo diferentes están unidos al alcano principal como ramificaciones, la secuencia para nombrarlos debe seguir el orden alfabético de los grupos sustituyentes (alquilo, sin considerar el número presente de cada cual y sin tomar en cuenta los prefijos di, tri y sucesivos).

En los alcanos se consideren dos tipos principales de reacciones: sustitución y adición. Un ejemplo de reacción de sustitución, es la del alcohol etílico con ácido yodhídrico para dar yoduro de etilo y agua; el grupo hidroxilo del alcohol es sustituido por yodo. Este tipo de reacciones se llaman también de desplazamiento; por ejemplo:  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{HI} \rightarrow \text{CH}_3\text{CH}_2\text{I} + \text{H}_2\text{O}$ . Una reacción de adición es la que ocurre cuando el dióxido de carbono se disuelve en agua, donde se abre el doble enlace de uno de los grupos carbonilo y el hidrógeno de una molécula de agua se une al oxígeno, mientras el grupo hidroxilo se une al carbono. Solamente se forma una pequeña cantidad de ácido carbónico ya que la reacción es reversible, y la reacción inversa, consiste en la eliminación de agua.

La reacción de adición se puede ilustrar de manera esquemática de la siguiente manera:



Algunas reacciones de adición son reversibles, otras no, la adición a los compuestos no saturados es posible gracias a la existencia de más electrones que el par requerido para unir los átomos no saturados. Los dos pares de electrones que forman un doble enlace difieren en propiedades, debido a que estos electrones ocupan orbitales de tipo diferente. Los electrones de un par se llaman electrones sigma y los del otro par, electrones pi. En la de orbitales; los electrones

pi están en unos orbitales en forma de lazo, con un plano de vibración perpendicular al plano de enlace sigma. Los electrones pi, que en cierto modo sobresalen de la molécula, pueden emplearse en formar enlaces sigma, más estables, con otros átomos. Figura 6.3

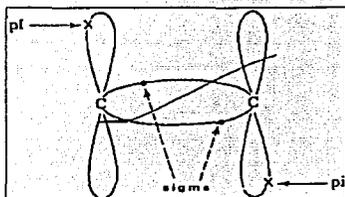
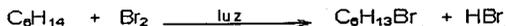


Figura 6.3 Esquema que representa a los electrones sigma y pi.

Los alcanos se encuentran completamente saturados y no tienen electrones pi para reacciones de adición, sólo son posibles reacciones de sustitución que no son muy comunes. El metano, etano, propano y los hidrocarburos de cadena normal más elevados son inertes frente a muchos reactivos. Si se agita el n-hexano (líquido) con ácido sulfúrico concentrado, no se disuelve ni reacciona y el hidrocarburo (densidad 0.66) se separa sin alteración en la capa superior. El n-hexano reacciona con el cloro y con el bromo, pero solo en determinadas condiciones. Si un tubo de ensayo que contiene n-hexano se coloca en lugar oscuro, y se le añade una gota de bromo, se tapa y se deja a temperatura ambiente, en ausencia de la luz, el color rojo del bromo se mantiene durante días con la misma intensidad. Si la solución se expone a la luz del sol, en pocos minutos desaparece el color y puede comprobarse que el bromhídrico es uno de los productos de la reacción sin más que soplar en la boca del tubo, pues el ácido condensa el vapor del aliento, formando humos. Esta reacción corresponde con una sustitución que se puede ilustrar de la siguiente manera:



De una forma más específica diremos que es una bromación inducida por luz, o fotoquímica. Los alcanos, en general, se pueden bromar o clorar fotoquímicamente, pero no iodar, por ser el yodo menos reactivo.

El cracking o descomposición térmica de los alcanos, es una reacción de gran importancia en la producción de carburantes para motores. El proceso consiste en pasar vapor de una mezcla de alcanos a través de un tubo caliente (500°) para inducir ruptura de enlaces carbono-carbono, rompiendo así las grandes moléculas en pequeños fragmentos.

En la tabla 6.1 se proporcionan nombre, fórmulas, puntos de fusión y ebullición de los primeros 15 alcanos de cadena recta (normales); los cuatro primeros miembros de esta serie homóloga son gases en condiciones ordinarias. Los alcanos son insolubles en agua y todos son menos densos que ella. Sus densidades varían desde aproximadamente 0.63 g/ml para el pentano hasta 0.77 g/ml para el pentadecano, obsérvese que en esta lista excepto los cuatro primeros miembros de la serie, la primera parte de cada nombre es un prefijo, derivado del griego o del latín, que indica el número de átomos de carbono de la molécula. El metano y el etano se pueden considerar como combinaciones de los grupos metilo y etilo con el hidrógeno,  $\text{CH}_3 - \text{H}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5 - \text{H}$ , de modo que la fórmula general de tales hidrocarburos es  $\text{RH}$ , y el nombre genérico alcanos. Etileno y acetileno son los nombres comunes de primer término de dos series de hidrocarburos caracterizados por tener doble o triple enlace, respectivamente; por ello en una nomenclatura sistemática elaborada en un Congreso Internacional celebrado en Ginebra, en 1890, estas series se designaron como alquenos (de etileno) y alquinos (de acetileno).

Fórmula molecular	Fórmula estructural	Nombre	pf, °C	pe, °C
CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>	Metano	-183	-161
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	Etano	-172	-88
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	Propano	-188	-42
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	Butano	-135	-0.6
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	Pentano	-130	36
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> CH <sub>3</sub>	Hexano	-95	69
C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	Heptano	-91	98
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> CH <sub>3</sub>	Octano	-57	125
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> CH <sub>3</sub>	Nonano	-54	150
C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> CH <sub>3</sub>	Decano	-30	174
C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>9</sub> CH <sub>3</sub>	Undecano	-26	196
C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> CH <sub>3</sub>	Dodecano	-10	216
C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>11</sub> CH <sub>3</sub>	Tridecano	-5.5	234
C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> CH <sub>3</sub>	Tetradecano	6	253
C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>13</sub> CH <sub>3</sub>	Pentadecano	10	270

Tabla 6.1 Alcanos de cadena recta.

La fórmula generalizada del grupo metano considera que el más sencillo de los alcanos es el metano, CH<sub>4</sub>, y el término siguiente es el etano, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, y en todos los casos el número de átomos de hidrógeno es dos veces el número de átomos de carbono, más dos. Así si  $n$  es el número de átomos de carbono, el número de átomos de hidrógeno es dos veces el número de átomos de carbono más dos. Si  $n$  es el número de átomos de carbono, el número de átomos de hidrógeno es  $2n + 2$  y, por consiguiente, la fórmula general de estos hidrocarburos y de cualquier otro alcano es C <sub>$n$</sub> H <sub>$2n+2$</sub> . Esta fórmula general está, desde luego, de acuerdo con las fórmulas empíricas del propano, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, y butano C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, que son los dos términos que siguen en la serie homóloga de los alcanos. Los términos siguientes tienen cada uno un carbono y dos hidrógenos más, es decir difieren en un grupo metileno CH<sub>2</sub>. Así la fórmula del alcano que tiene 10 carbonos, se puede derivar fácilmente de la fórmula general, siendo C<sub>10</sub>H<sub>22</sub>. El etileno, CH<sub>2</sub> → CH<sub>2</sub>, tiene dos hidrógenos menos que el etano, y cualquier alqueno debe tener dos hidrógenos menos que el etano, y cualquier alqueno debe tener dos hidrógenos menos que el alcano del mismo número de átomos de carbono, así que la fórmula general será C <sub>$n$</sub> H <sub>$2n$</sub> . El acetileno, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, y los hidrocarburos homólogos, tales como C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>6</sub> (siguen la

fórmula general  $C_nH_{2n-2}$ ).

A continuación se describen a los alcanos más comunes de los yacimientos petroleros.

### Metano.

El metano es el alcano de peso molecular más bajo; consta de un solo átomo de carbono y cuatro átomos de hidrógeno, en la figura 6.4 se representan dos modelos diferentes d una molécula de metano; (a) es un modelo compacto y (b) un modelo de barras y esferas. Ambos modelos muestran que la molécula no es una planta sino tetraédrica. El modelo compacto representa la superposición de los orbitales híbridos  $sp^3$  del átomo de carbono con los orbitales  $s$  de los cuatro átomos de hidrógeno.

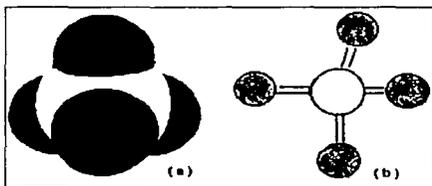


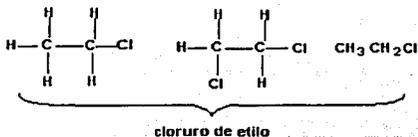
Figura 6.4 Modelos de metano: (a) compacto y (b) de barras y esferas.

Como el átomo de carbono es tetraédrico y la molécula de metano es simétrica en el espacio como se ve en la figura 6.5 (a), los cuatro átomos de hidrógeno son equivalentes, y si se cambia uno de ellos por cloro, es indiferente que la sustitución afecte a uno u otro hidrógeno. Si se cambia el hidrógeno superior de (a), se obtiene (b); en este modelo, el cloro (radio  $1.00 \text{ \AA}$ ) y el hidrógeno (radio  $0.32 \text{ \AA}$ ) es el más pequeño. Si se cambia por cloro el hidrógeno que aparece en (a) a la derecha, resulta (c), pero esta molécula es la misma de (b), solo que orientada de otra forma. Sólo es posible teóricamente un derivado monoclorado del metano y en efecto sólo se conoce una sustancia de fórmula  $CH_3Cl$ , la cual se designa correctamente como monoclorometano, aunque se conoce más por el nombre de cloruro de metilo.

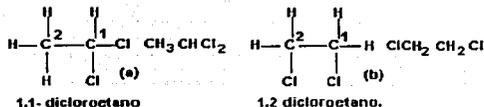
Si cualquiera de los átomos de hidrógeno que quedan en (b) o (c) se cambia por cloro, resulta (d), molécula que representa la única distribución espacial posible para  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ , el llamado cloruro de metileno.

### Etano.

Los seis hidrógenos del etano están situados idénticamente y son, por lo tanto, equivalentes; sólo es posible un derivado monosustituído. El derivado monoclorado, que se puede llamar monocloroetano, pero más generalmente se designa como cloruro de etilo, puede ser representado correctamente por cualquiera de las fórmulas que siguen, cada una de las cuales nos da la misma información.



Quando se introducen en la molécula de etano dos sustituyentes, aparece la posibilidad de isometría, ya que los sustituyentes pueden estar los dos en el mismo átomo de carbono o uno en cada carbono. Si dos cloros están unidos al mismo carbono, como en la fórmula (a) el compuesto que resulta se puede distinguir del isómero que aparece en la fórmula (b), numerando los átomos de carbono e indicando la posición de cada cloro por el número del átomo de carbono al que está unido. Como en el primer compuesto ambos están unidos al carbono N. 1 (o C1) se llama 1,1- dicloroetano, ya que cloroetano quiere decir monocloroetano. El segundo es el 1,2- dicloroetano; en este caso la molécula es simétrica y lo mismo da numerar los carbonos de derecha a izquierda, como se ha hecho, que la revés. Para el primer isómero, numerando de izquierda a derecha, le habríamos dado el nombre de 2,2-dicloroetano, pero se refiere siempre que los números sean los más bajos posibles. Así que escrita una fórmula, se deben probar todas las formas de numerar los átomos de carbono y seleccionar el nombre que nos dé los números más bajos para indicar la posición de los sustituyentes.



En el modelo de esferas y varillas (figura 6.5) (a) del 1,2-dicloroetano, las esferas no son exactamente del tamaño que les corresponde, pero las dos mayores unidas a los carbonos pueden presentar átomos de cloro y las cuatro menores los hidrógenos. Si el átomo de carbono inferior de este modelo se mantiene fijo, el carbono superior puede girar un ángulo de 180° alrededor del enlace simple que los une, dando como resultado el modelo (b). Los modelos (a) y (b) representan dos casos extremos, estando los cloros a la máxima distancia en (a) y lo más cerca posible en (b). Si la rotación es menor, podremos tener un número infinito de formas intermedias entre (a) y (b). Como experimentalmente se encuentra que sólo hay un 1,2-dicloroetano; se deduce que los átomos de carbono en la molécula tienen la misma libertad de giro alrededor del enlace sencillo o par de electrones compartidos, que las esferas en el modelo.

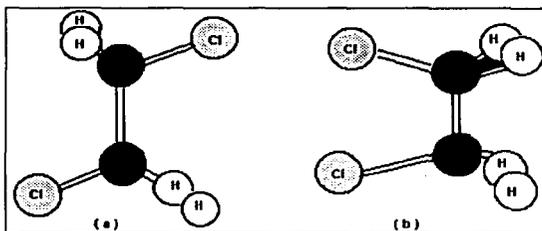


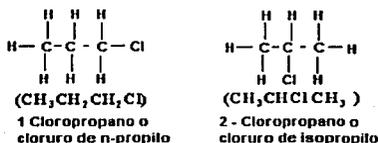
Figura 6.5 modelo de esferas y varillas de Dicloroetano.

**Propano.**

En la molécula del propano los ocho hidrógenos no tienen todos la misma

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

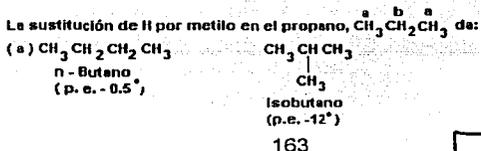
situación en la molécula. Los seis hidrógenos unidos a los carbonos terminales son equivalentes (líneas de puntos), pero la situación de estos seis es diferente de la de los hidrógenos unidos al átomo central del carbono. Aparece aquí una diferenciación entre las posiciones extremas y media de la molécula y de aquí que sean posibles dos productos isómeros monoinsaturados, poniendo como ejemplo los monocloroderivados; se pueden designar como 1-cloro y 2-cloro derivados del propano pero más común se llaman cloruro de propilo normal (n-) y cloruro de isopropilo.



En tanto que no hay más que una forma posible para los grupos metilo ( CH<sub>3</sub> -) o etilo ( C<sub>2</sub> H<sub>5</sub> -), el siguiente radical de hidrocarburo puede ser n - propilo, CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub> -, o el isopropilo (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CH -. La sustitución de más de un hidrógeno en el propano, da origen a buen número de isómeros.

**Butanos.**

La fórmula del etano puede ser derivada de la del metano cambiando un hidrógeno por un grupo metilo, y la fórmula del propano puede derivarse de modo similar de la del etano. Este método sistemático es útil ya que haciendo la sustitución en cada término de todas las formas posibles, aparecerán todos los isómeros del término siguiente. El propano tiene dos diferentes átomos de hidrógeno, los de los extremos (a) y los del medio de la molécula (b), así que para derivar los butanos, debe hacerse la sustitución por metilo de un hidrógeno de cada tipo:



**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**



tres pentanos. Naturalmente el nombre para el hidrocarburo de cadena recta a) es n-pentano; el hidrocarburo b) de cadena ramificada, puede considerarse como metil derivado del hidrocarburo de cuatro carbonos de cadena normal, es decir el n-butano; y el grupo metilo está unido al átomo de carbono N.2 (contando de derecha a izquierda, pues de otro modo resultaría un número mayor), este compuesto se llamará 2-metilbutano. El tercer isómero puede llamarse (Nomenclatura de Ginebra) 2,2-dimetilpropano, pero un nombre más sencillo resulta de considerar que tiene un carbono central al que están unidos cuatro metilos, así que se puede llamar tetrametilmetano (CH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>C. Es el isómero más ramificado tiene mayor volatilidad.

En resumen:

n- pentano	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	p.e 36.1°
2- Metilbutano	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH(CH <sub>3</sub> )CH <sub>3</sub>	p.e.27.9°
Tetrametilmetano	(CH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> C	p.e. 9.5°

**Hexanos.**

Se deriva de su fórmula de forma similar al (5 isómeros). Son los hidrocarburos con la más larga cadena; la posición de los sustituyentes se indica mediante números.

A temperatura ordinaria, el metano, etano, propano y n-butano, son gases; los alcanos de C<sub>5</sub> a C<sub>17</sub> de cadena normal son líquidos y los de C<sub>18</sub> en adelante son sólidos. El n-heptacontano, de fórmula C<sub>70</sub>H<sub>142</sub>, que ha sido sintetizado, tiene un punto de fusión de 105° y puede ser destilado en alto vacío (a la presión de 10<sup>-5</sup> mm de mercurio). Este cambio de gas a líquido y sólido al aumentar el peso molecular, es análogo a lo que ocurre en la serie de los halógenos: Cl<sub>2</sub>, gas; Br<sub>2</sub> líquido; I<sub>2</sub> sólido. En la figura 6.6 se representan gráficamente los puntos de ebullición de los diez primeros hidrocarburos de cadena normal en función de su peso molecular. La curva crece rápidamente al principio, ya que el aumento de 14 unidades en el peso molecular por cada CH<sub>2</sub> supone un aumento relativo considerable cuando el peso molecular es pequeño. La diferencia entre las



temperaturas de ebullición de los términos  $C_1$  y  $C_2$  es de  $73^\circ$ , pero la diferencia entre los términos  $C_9$  y  $C_{10}$  es únicamente de  $25^\circ$ . Se deduce entonces que: los primeros alcanos son más fácilmente separables por destilación fraccionada que los términos superiores. Esto es un punto de referencia en la curva; el n-alcano de peso molecular 100 hierve aproximadamente a los  $100^\circ$ . Una curva muy similar para los n-alcanos, nos dará la relación entre las variables consideradas para otros compuestos que se encuentran no asociados en la fase líquida, es decir que no formen agregados moleculares. Si un compuesto alifático con cadena recta pertenece a un tipo que no presente asociación, su punto de ebullición puede ser calculado en la gráfica, en primera aproximación.

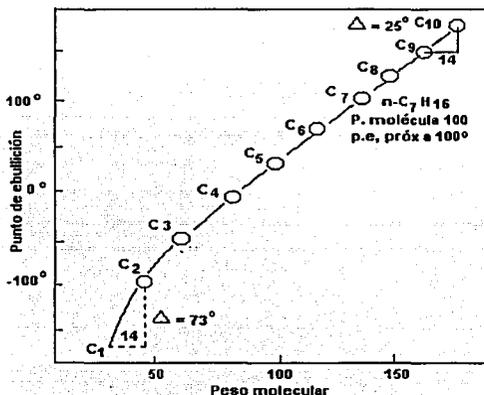


Figura 6.6 Puntos de ebullición de los n-alcanos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### 6.1.4 Naftenos, o Cicloalcanos (Alicíclicos).

Son hidrocarburos saturados, de enlace simple. Tienen estructura de cadena cerrada, cíclica o de anillo. También son llamados cicloalcanos y se caracterizan porque, los orbitales atómicos del carbono son híbrido  $sp^3$ . Sin embargo, solo en los anillos de seis o más átomos de carbono la "superposición" es por completo frontal con posibles ángulos de enlace de  $109^\circ$  y solo en estos casos, ya que no todos los átomos de carbono deben estar en el mismo plano, (Figura 6.7)

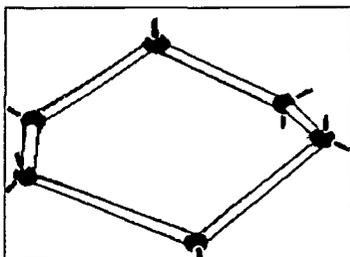


Figura 6.7 Modelo del ciclohexano que muestra la superposición de los orbitales  $sp^3$  y el anillo no planar.

La conformación no planar más estable para el ciclohexano es la llamada forma de silla; en esta conformación, el ángulo de enlace se mantiene aproximadamente tetraédrico y todos los hidrógenos de los carbonos adyacentes se hallan alternados. Por convención, la conformación de silla se representa mediante la fórmula estructural 6.8 Los modelos estructurales representan los enlaces, ángulos de enlace y longitudes de enlace aproximadas; estos no describen el espacio que ocupan los orbitales o nubes electrónicas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

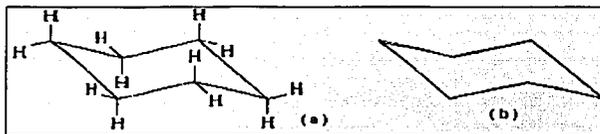


Figura 6.8 (a) Fórmula estructural convencional de la conformación en silla del ciclohexano (b) Fórmula estructural simplificada.

Los enlaces carbono-carbono en el ciclo propano son casi tan débiles como el enlace pi carbono-carbono. En la figura 6.9 se observan las representaciones: (a) del ciclopentano, (b) del ciclobutano y (c) del ciclopropano. Algunos reactivos pueden romper los enlaces carbono-carbono tanto del ciclobutano como del ciclopropano, con la consecuente apertura del anillo.

En la formación del ciclopentano, todos los átomos de carbono deben quedar casi en el mismo plano si la superposición frontal se aumenta al máximo; los átomos de carbono del ciclopentano tienden a formar un pentágono regular casi plano (ángulos de  $108^\circ$ ).

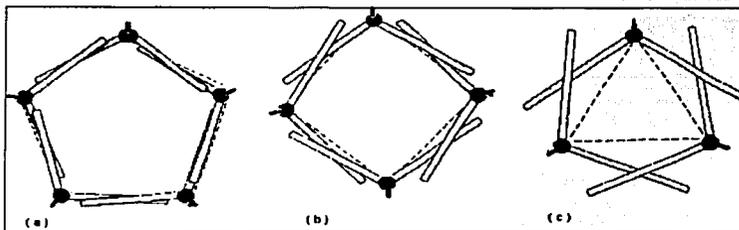


Figura 6.9 Superposición de los orbitales  $sp^3$  del carbono en (a) el ciclopentano, (b) el ciclobutano y (c) el ciclopropano

Los ángulos de enlace son muy poco menores a  $109.5^\circ$ , el ángulo es tetraédrico. Si la estructura no fuera planar, los ángulos de enlace se reducirían aún más. Esto traería consigo una menor superposición frontal y una mayor superposición lateral más débil. Sin embargo, el anillo de ciclopentano no es por completo plano debido

a que la repulsión de sus hidrógenos, todos los cuales quedarían eclipsados si el anillo fuera plano. (Figura 6.10).

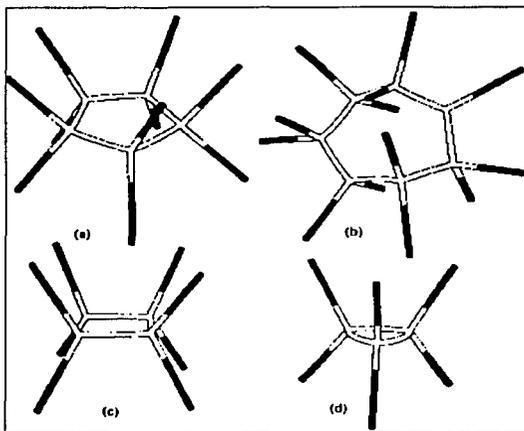
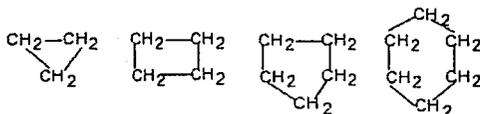


Figura 6.10 Modelos de algunos cicloalcanos: (a) ciclopentano, (b) cicloheptano, (c) ciclobutano, (d) ciclopropano.

El examen de los modelos tetraédricos unidos con resortes de acero, hace pensar que puede existir un hidrocarburo con tres carbonos unidos formando un anillo y saturado cada carbono con hidrógenos. Tal compuesto es conocido y como tiene el mismo número de carbonos que el propano, es cíclico, se llama ciclopropano. Es el primero de la serie de los cicloalcanos, compuestos que tienen la misma fórmula general que los alquenos,  $C_nH_{2n}$ . Las fórmulas de estos compuestos se pueden escribir como se indica a continuación, o de modo más breve, escribiendo únicamente las líneas de enlace.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Especialmente son importantes los derivados del ciclohexano que pueden ser representados por fórmulas abreviadas como se observa en la figura 6.11; el ciclohexeno y ciclohexano no requieren números para indicar la posición de los grupos funcionales, ya que las seis posiciones del ciclohexano son idénticas. En el último ejemplo se indica cómo se procede cuando se necesitan números (en este caso para indicar la posición de los sustituyentes).

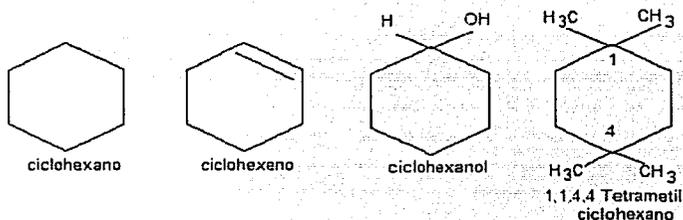


Figura 6.11 Derivados del ciclohexano.

El nombre principal del cicloalcano se deriva añadiendo el prefijo ciclo al nombre de alcano lineal que tenga el mismo número de átomos de carbono (figura 6.12). A cada sustituyente de un cicloalcano se le asigna el número de ubicación más pequeño posible; esto significa que la numeración debe comenzar en el átomo de carbono al que esté unido el sustituyente. Si la misma ramificación o grupo aparece más de una vez, debe emplearse un prefijo asociado (di, tri, tetra).

Fórmula molecular	Fórmula estructural	Fórmula estructural simplificada	Nombre	pf. ° C	pe. ° C
$C_3H_6$			ciclopropano	-126	-34
$C_4H_8$			ciclobutano	-50	13
$C_5H_{10}$			ciclopentano	-93	50
$C_6H_{12}$			ciclohexano	6	81
$C_7H_{14}$			cicloheptano	12	118

Figura 6.12 Fórmulas, nombres, puntos de fusión y ebullición de algunos cicloalcanos.

Los alcanos se encuentran en abundancia en diversos depósitos terrestres naturales (yacimientos petroleros) por lo general como mezclas complejas. Se dispone de métodos de laboratorio para la síntesis de alcanos puros en caso de que se requieran.

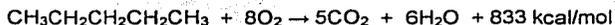
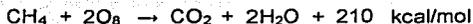
El petróleo es la fuente principal de muchos alcanos acíclicos y de algunos cíclicos, a medida que el petróleo se hace más escaso, resulta necesario reservarlo para darle uso como materia prima industrial, en vez de quemar tanto para la producción de calor y energía.

En la actualidad se han desarrollado técnicas para producir hidrocarburos saturados a partir de hulla, lutita oleosa y de la reacción de monóxido de carbono con hidrógeno. Ya que cada vez resulta más difícil disponer de petróleo y su precio sigue en aumento; estos procedimientos se han tomado factibles y competitivos desde el punto de vista económico.

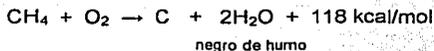
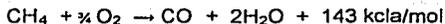
Las principales reacciones de los alcanos son de oxidación, específicamente, cloración, brotación y combustión con oxígeno. Las tres reacciones tienen

lugar en forma espontánea, con producción de calor, una vez que se han iniciado. Incluyen radicales libres como intermediarios.

La combustión de los alcanos es de valor fundamental por el calor que produce para el hogar, la industria y la producción y la producción de energía. La cantidad de calor que se produce por mol aumenta conforme se incrementa el tamaño de la molécula de alcano. Por cada átomo de carbono adicional, se producen cerca de 156 kcal de energía por mol.

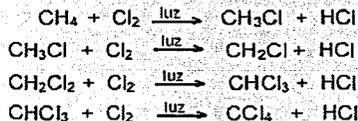


Una menor cantidad de oxígeno da como resultado una combustión incompleta y la formación de hollín, o negro de humo, y el gas tóxico denominado monóxido de carbono.

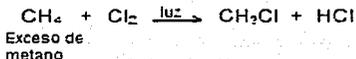


Halogenación de los alcanos.

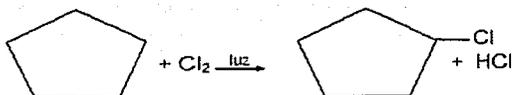
La halogenación de alcanos es una reacción de interés, pero en la mayor parte de los casos es de valor limitado, es síntesis debido a que se obtiene una mezcla de productos; puede haber sustitución múltiple. Por ejemplo en la cloración del metano se produce una mezcla de clorometano, diclorometano, triclorometano y tetraclorometano, como se indica a continuación:



Si se emplea un exceso del alcano, puede incrementarse el rendimiento del producto monosustituído. El exceso del alcano compite con el producto monohalogenado en la reacción con el halógeno, como se muestra a continuación:



Los cicloalcanos reaccionan en forma semejante, tal como se muestra en los siguientes esquemas.



La halogenación de los alcanos se inicia en presencia de luz o temperaturas cercanas a los 300° C. El orden de reactividad de los halógenos con los alcanos  $\text{F}_2 > \text{Cl}_2 > \text{Br}_2 > \text{I}_2$ . Sin embargo, la reacción de fluoración es muy violenta para fines prácticos y el yodo no reacciona en absoluto.

### 6.2 Hidrocarburos insaturados.

Los hidrocarburos insaturados comprenden a todos aquellos compuestos alicíclicos y cíclicos con uno o más enlaces dobles, uno o más enlaces triples o ambos. Los cuales denominaremos alquenos, (enlace doble), dos enlaces dobles (dienos), un enlace triple (alquinos), los principales tipos se indican en la figura 6.13

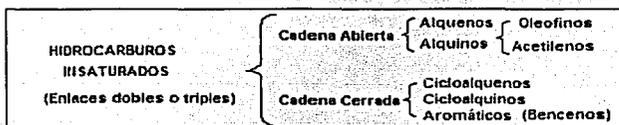


Figura 6.13 Clasificación de los Hidrocarburos Insaturados.

#### 6.2.1 Alquenos.

Los alquenos son hidrocarburos insaturados con un enlace doble carbono-carbono. Los alquenos acíclicos tienen la fórmula general  $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ , y los alquenos

cíclicos tienen la fórmula general  $C_nH_{2n-2}$ . La principal fuente comercial de alquenos es la industria del petróleo, en la cual los alquenos se obtienen como subproductos de la pirólisis del petróleo (craqueo). Muchos productos naturales más complicados también contienen enlaces dobles carbono-carbono; por ejemplo la vitamina A y el colesterol; el grupo funcional de un alqueno es el enlace doble carbono-carbono. El alqueno más simple que contiene dicho grupo funcional es  $CH_2 = CH_2$ , su nombre es eteno, pero el nombre comúnmente utilizado es etileno, aún en uso, en la figura 6.14 se presenta el modelo esquemático para el etileno.

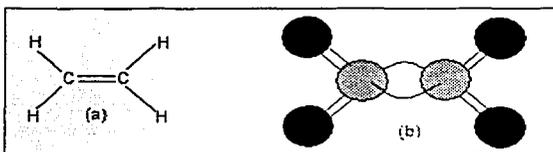
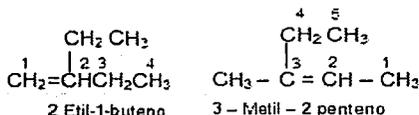


Figura 6.14 Eteno (etileno): (a) Fórmula general; (b) modelo de esferas y resortes.

En el sistema nomenclatura antiguo, la primera parte del nombre del alqueno era la misma que la del alcano con igual número de átomos de carbono. El sufijo -ano cambia a -ileno par formar el nombre común. Así  $C_3H_6$  recibió el nombre del propileno y  $C_4H_8$  el de butileno; la cadena continua más larga que contiene el enlace doble es el alqueno principal. La raíz del nombre del alcano se conserva y se le añade el fijo eno. Los números de ubicación designan el átomo de carbono donde comienza el doble enlace, hincándose desde el extremo que dé el menor número de ubicación a la posición del doble enlace; las diferencias mas significativas de observan en los siguientes dos ejemplos:



La distancia entre carbonos doblemente enlazados es de  $1.34 \times 10^{10}$  m, en

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

comparación con  $1.54 \times 10^{-10}$  m entre los carbonos con un único enlace de un alcano, el enlace sigma que une los carbonos con un único enlace de un alcano. El enlace sigma que une los carbonos alquelinicos se compone de orbitales  $sp^2$ ; por esta razón tiene más carácter de s y es más corto que un enlace sigma de un átomo de carbono alquilico, el cual está formado por orbitales híbridos  $sp^3$ . Los electrones del orbital pi se proyectan en un plano hacia cualquier lado del plano del resto de la molécula; es decir, los dos planos son perpendiculares entre sí. Esto ocasiona que el enlace pi se rompa con relativa facilidad, y los electrones pueden así intervenir en la formación de enlaces más fuertes con otros átomos. Esto explica por qué la reacción principal de los alquenos es la adición electrofílica al enlace dobles. Los electrofílos son átomos o grupos deficientes de electrones. También se describen como "ávidos de electrones" o que "tienen afinidad por los electrones". Los electrofílos pueden romper el enlace pi, por lo la rotación restringida en torno al enlace doble, lo cual hace posible la existencia de isometría cis-trans.

Si queremos hacer un modelo del etileno con esferas y varillas, hay que unir los enlaces de los dos grupos metileno (a) de alguna manera, puede hacerse usando trozos de tubo de goma (b) o reemplazando las varillas que representan los enlaces por muelles de acero (c) como se muestra en la figura 6.15. Naturalmente, tanto los trozos de goma de (b) como los muelles de (c) están sometidos a tensión; lo que sugiere que el doble enlace tiene también una tensión determinada, siendo, por tanto, proceso a abrirse y dar un derivado del etano, que no tiene tensión. Estos modelos nos hacen pensar que el etileno y otros alquenos han de ser compuestos reactivos, lo cual es correcto. Alquenos y alquinos en los alcanos tienen todas las valencias que no se utilizan en los enlaces C – C, están saturadas por hidrógeno, se llaman hidrocarburos saturados, mientras que los alquenos y alquinos son hidrocarburos no saturados.

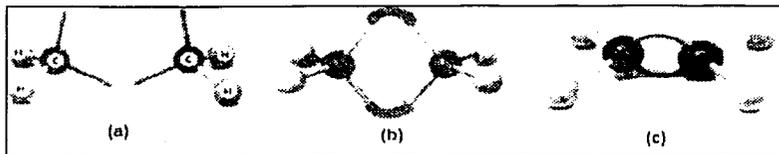


Figura 6.15 Representación esquemática de modelos del etileno.

El modelo (c), que puede tener un mejor arreglo como (d) como se muestra en la figura 6.18 demuestra que los cuatro hidrógenos y los dos carbonos del etileno están en el mismo plano. La molécula es simétrica, equilibrada, ya que los hidrógenos de un lado tienen su contrapeso en los del lado opuesto. Pero si observamos la fórmula del butano - 2,  $\text{CH}_3\text{CH}=\text{CHCH}_3$  la situación es diferente, Cada carbono del doble enlace está unido a dos grupos o átomos diferentes, un hidrógeno y un metilo, y son posibles dos disposiciones en el espacio. Cuando están ordenados como en (e) los dos metilos están al mismo lado de la molécula, mientras que la agrupación (f) los metilos están cruzados; el doble enlace impide la conversión de una forma en la otra, por rotación de un carbono. En efecto, el butano - 2 existe en dos formas isómeras, ambas con la estructura indicada por la fórmula  $\text{CH}_3\text{CH}=\text{CHCH}_3$ , pero que difieren en su ordenación en el espacio, en su configuración. Cuando los isómeros difieren solamente en configuración u ordenación espacial, se llaman estereoisómeros y en caso particular de isometría en los butenos se llama isometría geométrica.

La forma (e) se llama cis - buteno - 2 y la forma (f) trans - buteno - 2. Estos prefijos derivan de las preposiciones latinas cis y trans que significan "a este lado" y "a través". En los modelos (e) y (f) de las figuras 6.16, las esferas que representan los grupos metilo, estos son ligeramente mayores que las que representan hidrógenos, pero esta diferencia no está totalmente de acuerdo con la diferencia de volumen de los grupos, que es mayor.

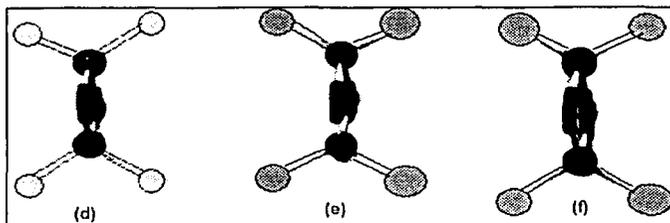


Figura 6.16 Modelos del etileno.

### 6.2.2 Alquinos.

Los alquinos son hidrocarburos que tienen un enlace triple carbono – carbono; su fórmula general es  $C_nH_{2n-2}$ . Como debe haber por lo menos dos carbonos para que exista el enlace triple carbono – carbono, el primer homólogo a la serie es  $C_2H_2$  acetileno, cuyo nombre es etino.

Los átomos de carbono del enlace triple están unidos entre sí y a un átomo de hidrógeno. En la formación de los enlaces sigma de esta distribución sólo intervienen dos de los electrones de enlace de cada átomo de carbono: el electrón 2s y uno de los electrones 2p. Los orbitales de los dos electrones que tienen hibridarse para formar dos orbitales híbridos sp.

La geometría óptima que permite la máxima superposición para formar los tres enlaces sigma es lineal con ángulos de enlace de  $180^\circ$ . A cada átomo de carbono aún le quedan dos electrones en sus orbitales 2p con orientación perpendicular entre sí; de esta manera los orbitales 2p de cada átomo de carbono pueden superponerse en forma lateral para producir dos orbitales moleculares pi perpendiculares entre sí.

Por lo tanto, el enlace triple entre átomos de carbono está compuesto por un enlace sigma y dos enlaces pi como se indica en la figura 6.17

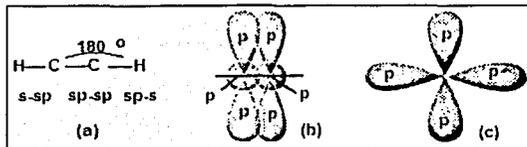


Figura 6.17 Enlace triple en el etileno (acetileno): (a) enlaces sigma; (b) vista lateral de los enlaces pi y (c) vista final de los enlaces pi.

La distancia entre los átomos de carbono se acorta a  $1.2 \times 10^{-10}m$  debido a la proporción de carácter s de los orbitales  $sp^2$  de los enlaces dobles y de los orbitales  $sp^3$  de los enlaces sencillos de carbono.

En la figura 6.18 se representan modelos de acetileno, en estos modelos la molécula estructural muestra los dos orbitales moleculares tipo enlace pi perpendiculares entre sí. El modelo compacto ilustra los dos enlaces pi superpuestos y difundidos uno con otro formando un espacio cilíndrico, concéntrico al enlace sigma.

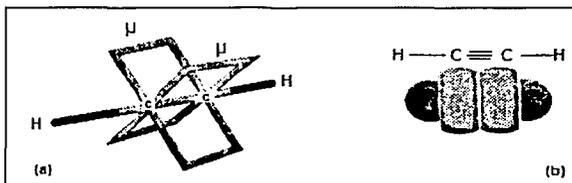


Figura 6.18 (a) Modelo molecular estructural y (b) modelo compacto del acetileno.

A los alquinos comúnmente se les denomina derivados del acetileno, el  $CH_3C = CH$  es conocido como metilacetileno;  $CH_3C = C - CH$ , es deimetilacetileno, y  $CH_3CH_2C = CH$  etilacetileno. El sufijo ano del alcano principal se cambia por ino:  $HC=CH$  es etino,  $CH_3C=CH$  es propino;  $CH_3C = C - CH_3$  es 2 - butino y  $CH_3CH_2C=CH$  es 1-butino.

Al igual que los alcanos y alquenos, los alquinos que contienen hasta cuatro

átomos de carbono son gases, y los homólogos  $C_5$  y superiores líquidos. La alta proporción de carbono hidrógeno hace que se formen residuos de carbón durante la combustión.

Por esto los alquinos arden con flama luminosa humeante; en la figura 6.19 aparecen las fórmulas, nombres y propiedades de algunos alquinos simples.

Fórmula estructural	Nombre	Nombre común	$pt^{\circ} C$	$pe^{\circ} C$
$HC \equiv CH$	Etino	Acetileno	- 81.8	- 83.6
$CH_3C \equiv CH$	Propino	Metilacetileno	- 101.5	- 23.4
$CH_3CH_2C \equiv CH$	1- Butino	Etilacetileno	- 122.5	8.6
$CH_3C \equiv C - CH_2$	2- Butino	Dimetilacetileno	- 32.3	27.2
$CH_3CH_2CH_2C \equiv CH$	1- Pentino	npropilacetileno	- 90	39.3
$CH_2 = CH - C \equiv CH$	1-Buten-3-ino	Vinilacetileno		5.0

Figura 6.19 Ejemplos de alquinos simples.

Los primeros cuatro homólogos de los alquinos son gases, los alquinos arden con flama luminosa y humeante. El acetileno arde con oxígeno produciendo una temperatura relativamente alta, por lo cual se emplea en sopletes de oxiacetileno. El acetileno se prepara en forma industrial a partir de caliza, coque y metano. Los alquinos experimentan reacciones de adición con hidrógeno, halógenos, haluros de hidrógeno, agua, y cianuro de hidrógeno. Los alquinos con enlaces triples terminales (que tienen hidrógeno acetilénico) reaccionan con sodio metálico desprendiendo hidrógeno; estos alquinos también reaccionan con sales de metales pesados formando un precipitado del acetiluro de metal pesado.

### 6.2.3 Aromáticos.

Los hidrocarburos aromáticos son compuestos insaturados de un tipo especial, originalmente recibieron el nombre de aromáticos debido al aroma que algunos poseen; sin embargo, no todos son odoríferos y muchos compuestos fragantes no son tipo aromático.

#### Benceno.

Uno de los compuestos más simples y que se conoció primero con la estructura especial característica de los compuestos aromáticos fue el hidrocarburo benceno.

En 1825, Michael Faraday descubrió el benceno en el gas de iluminación; en 1834, en Alemania, Mitscherlich obtuvo el mismo compuesto por calentamiento del ácido benzoico del bálsamo de benjuí con cal. Mitscherlich estableció la fórmula molecular como  $C_6H_6$ . Se propuso el nombre feno para  $C_6H_6$  debido a que Faraday había descubierto el compuesto en el gas de iluminación, feno viene de una palabra griega que significa luz. Aunque se adoptó el nombre feno en forma de fenilo para el grupo  $C_6H_5$ , se aceptó el nombre benceno para el compuesto debido a su relación con el ácido benzoico y bálsamo de benjuí.

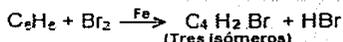
El benceno es un líquido volátil y su vapor es muy tóxico en concentraciones elevadas; también es carcinógeno (produce cáncer), y por esta razón solo debe emplearse con buena ventilación. Los alquibencenos (por ejemplo el tolueno) sólo son un poco menos tóxicos, de modo que debe evitarse la inhalación de sus vapores.

La fórmula  $C_6H_6$  indica un alto grado de insaturación, y el benceno arde con flama luminosa muy humeante como la de la combustión de los alquinos y dienos. Sin embargo, el benceno no decolora al bromo en tetracloruro de carbono ni a una solución diluida fría de  $KMnO_4$ , lo cual indica que no reacciona como lo hacen los alquenos y los alquinos. En general, no experimenta las reacciones de adición características de los alquenos y los alquinos; en vez de ello muestra estabilidad parecida a la de los alcanos. En realidad, el benceno es estable aún en una solución hirviente de  $KMnO_4$ . No obstante, reacciona con el bromo en presencia de hierro como catalizador, pero en la reacción se forma HBr.

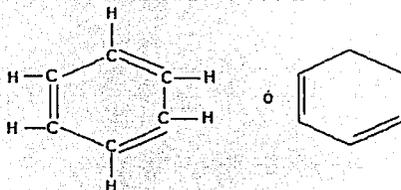


Esto indica una reacción de sustitución en vez de una adición. Además, solo se produce bromobenceno; nunca se han encontrado isómeros del bromobenceno. Esto indica que los seis átomos de carbono son estructuralmente equivalentes.

La fórmula estructural de Kekulé fue propuesta por:

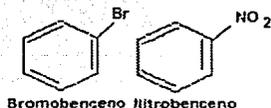


El armonizar las propiedades del benceno con una fórmula estructural racional fue un gran problema para los químicos de mediados del siglo XIX; ya que después de 40 años que Faraday descubriera el benceno en 1865, August Kekulé propuso una estructura con la que podían explicarse casi todas las propiedades conocidas del benceno. Ideó una distribución cíclica plana de seis átomos de carbono con enlaces dobles y simples alternados y un hidrógeno unido a cada carbono.

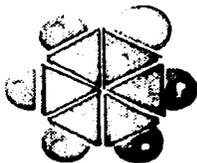


La estructura que proponía Kekulé tendría seis átomos de hidrógeno equivalentes, de modo que sólo se esperaría un benceno monosustituído, como se muestra en la siguiente figura:

El modelo compacto de bromobenceno es:



Bromobenceno Nitrobenzeno



Por lo tanto los tres derivados del benceno que comúnmente se encontraron podían representarse mediante las estructuras que se representan en la figura 6.20

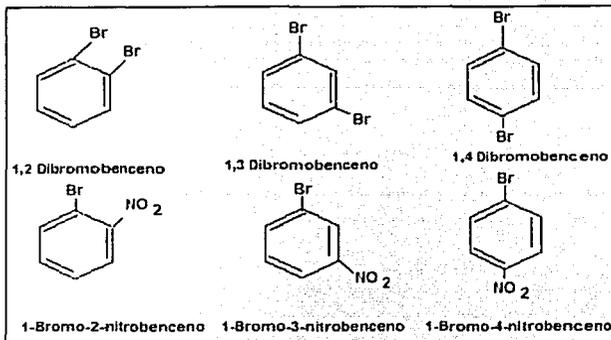
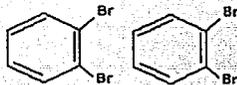


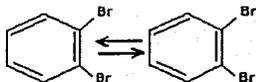
Figura 6.20 Estructura de algunos derivados del benceno.

El concepto de una molécula cíclica constituyó un avance importante, que fue la clave para la estructura del benceno, el primer compuesto orgánico cíclico que se reconocía como tal. De inmediato, otros químicos aceptaron la exactitud de la estructura cíclica. Sin embargo, no quedaron por completo satisfechos con la solución de Kekulé y propusieron otras estructuras cíclicas. La estructura de Kekulé señala la posibilidad de dos 1,2-dibromobenzenos isómeros y sólo se encontró uno. En uno de los isómeros, los átomos de carbono a los cuales estarían unidos los átomos de bromo se hallarían separados por un enlace doble, y en el otro, por un enlace simple:



Para explicar la discrepancia, Kekulé propuso que las dos formas del benceno y las de los derivados del benceno se encontraban en estado de equilibrio tan fácil de alcanzar que resultaba imposible el aislamiento de las moléculas separadas.

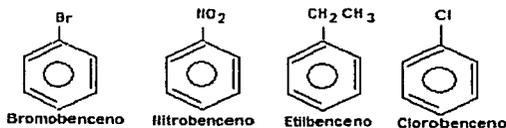
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Ahora se sabe que la proposición fue errónea; no existe tal equilibrio, sin embargo, de las diversas fórmulas que se propusieron por esa época, las de Kekulé aun subsiste; en 1965 se celebró el centenario de la valiosa aportación de Kekulé.

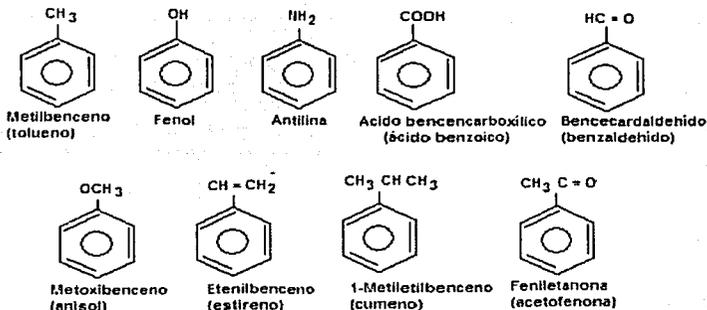
Cada átomo de carbono del benceno está unido a dos átomos de carbono adyacentes y a un átomo de hidrógeno, por lo tanto la hibridación de los orbitales en el carbono no es  $sp^2$  con ángulos de enlace de  $120^\circ$  (en forma semejante a los alquenos), y en consecuencia la molécula es toda planar. Cada átomo de carbono tiene un electrón en el orbital 2p restante. Los orbitales 2p se superponen de modo lateral con los orbitales 2p de los átomos de carbono adyacentes para formar un orbital circular pi. Como todos los enlaces tienen la misma longitud, cada orbital 2p debe superponerse con su vecino de un lado así como con su vecino del otro lado; una fase del orbital pi se encuentra por encima del plano del anillo y la otra por debajo del plano del mismo. Podría considerarse que el benceno se asemeja a una hamburguesa; los átomos de carbono e hidrógeno, unidos por enlaces sigma, corresponderían a la carne y el orbital molecular pi a las dos mitades de pan.

La verdadera uniformidad de los enlaces y la distribución electrónica ha hecho que muchos químicos rechacen la fórmula Kekulé y representen al benceno mediante un hexágono con un círculo en el centro a fin de ilustrar la singularidad del enlace pi. A los derivados monosustituídos del benceno se les dan en forma sistemática nombre como derivados de éste, las más comunes son las siguientes:

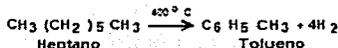


No obstante, algunos de los derivados monosustituídos del benceno tienen sus nombres propios especiales y se siguen utilizando, las que a continuación se

indican:



En cierta época, el alquitrán de hulla fue la principal fuente de benceno, tolueno y xilenos (dimetilbencenos); es el material volátil que destila cuando la hulla se somete a calentamiento en hornos para producir coque. En la actualidad, el benceno, el tolueno y los xilenos se obtienen en cantidades mucho mayores a partir del petróleo. Al hacer pasar una fracción de destilación de seis carbonos sobre un catalizador de platino de deshidrogenación a 400° C se forma benceno. El tolueno se obtiene a partir de una fracción de siete carbonos y los xilenos de una de ocho carbonos, el tolueno por ejemplo puede producirse de la siguiente manera:



Otro tipo de hidrocarburos aromáticos es el sistema de anillos bencénicos condensados. Los compuestos de este tipo se llaman hidrocarburos aromáticos policíclicos, y su fuente principal es el alquitrán de hulla; están constituidos por dos o más anillos bencénicos condensados.

**Naftaleno.**

El naftaleno es un sólido, pf 80° C, formado por dos anillos bencénicos.

Estructuralmente es un híbrido de resonancia cuyas formas electrónicas principales se proporcionan a continuación. En el sistema antiguo de nomenclatura, los átomos de carbono 1 y 2 se identificaban como alfa ( $\alpha$ ) y beta ( $\beta$ ).



Por ser híbrido de resonancia, el naftaleno suele presentarse mediante la fórmula estructural.



sin embargo, en este caso la fórmula estructural (b) con los círculos no resulta tan satisfactoria como lo es para el benceno, debido a que no todos los enlaces son de la misma magnitud ni de la distribución de los electrones  $\pi$  es uniforme sobre todos los enlaces. Los enlaces en realidad poseen características de enlace doble y de enlace simple, como se ilustra en (a); en consecuencia, la estructura del naftaleno casi siempre se representa mediante la fórmula (a). En particular, esta forma electrónica es más estable y hace una mayor contribución al híbrido de resonancia que la estructura, ya sea a su derecha o a su izquierda. Por lo tanto (a) es mejor representación.

El naftaleno es el componente simple más abundante en el alquitrán de hulla; el rendimiento promedio es casi de 11% en peso de alquitrán. Es importante como fuente de ácido ftálico, el cual se emplea en preparación de colorantes y también en resinas para pinturas.

Gran número de hidrocarburos de anillos bencénicos condensados se obtienen del alquitrán de hulla. Tal vez no existan en la hulla misma, sino que se formen a

causa del calentamiento intenso que se requiere para destilar el alquitrán. Algunos de estos compuestos son: Antraceno, Fenantreno, Pireno, Benzopireno y Dibenzantraceno.

#### **Aromaticidad.**

Los compuestos policíclicos aromáticos se forman y se encuentran en el humo de todo compuesto orgánico que se quema aproximadamente a 600° C. Se ha observado que en algunos compuestos policíclicos que se forman de esta manera causan cáncer, de modo que debe evitarse la inhalación de humo.

Para ser aromático, un anillo aromático debe cumplir con la regla de Hückel, la cual establece que dicho anillo debe contener  $(4n + 2)$  electrones  $\pi$ , donde  $n = 0, 1, 2, 3 \dots$ . El tipo más común de anillo aromático es aquel en el cual  $n = 1$ ; por lo tanto, el anillo contiene seis electrones  $\pi$ . Los anillos heterocíclicos son aquellos que contienen algunos otros átomos en el anillo, además de los átomos de carbono; los heterátomos más importantes son el nitrógeno, el oxígeno y el azufre. Algunos de los sistemas anulares heterocíclicos aromáticos más importantes son: pirrol, furoano, tiofeno, imidazol, piridina, pirimidina, idol, quinolina y purina.

#### **6.3 Clasificación de los aceites crudos.**

Los yacimientos de aceite crudo están constituidos por hidrocarburos líquidos, a las condiciones de presión y temperatura del yacimiento, con una viscosidad menor o igual a 10,000 centipoises. Esta viscosidad es medida a la temperatura original del yacimiento y a la presión atmosférica, como un líquido estabilizado libre de gas. Asimismo, es práctica común hablar de clases de aceite crudo de acuerdo a su peso específico, y expresado en una escala normalizada por el Instituto Estadounidense del Petróleo (American Petroleum Institute), esta escala es llamada densidad API, o comúnmente conocida como grados API.

La producción de los diversos yacimientos productores está asociada a un solo tipo de aceite crudo. En la tabla 6.2 se muestran las densidades de los aceites crudos.

CLASIFICACION DEL ACEITE DE ACUERDO A SU DENSIDAD		
Aceite crudo	Densidad	Densidad en (gr/cm)
Extra pesado	> 1.0	10
Pesado	1.0 - 0.92	10.0 - 22.3
Mediano	0.92 - 0.87	22.3 - 31.1
Ligero	0.87 - 0.83	31.1 - 39
Superligero	< 0.83	> 39

Tabla 6.2 Clasificación del aceite de acuerdo a su densidad.

La clasificación que propone Tissot (et. al. 1978), figura 6.21, se basa en los diversos tipos estructurales de hidrocarburos: alcanos, cicloalcanos, naftenos y aromáticos más compuestos N,S,O (resinas y asfaltenos). Las condiciones físicas a las que se clasifico el petróleo fueron: crudos con puntos de ebullición superior a los 210°C y presión atmosférica. Las clases que obtuvo son los siguientes:

- Clase parafínica. Constituida dentro de los crudos ligeros, siendo algunos fluidos y otros con un alto contenido de cera o alto punto de escurrimiento. El peso específico es en general menor a 0.85, la cantidad de resinas más asfaltenos es menor al 10%. La viscosidad es generalmente baja, excepto cuando los alcanos normales de peso molecular alto son abundantes, el contenido de aromáticos es subordinado y el de azufre muy bajo.
- Clase parafínica-nafténica. Tienen una proporción moderada de resinas (normalmente del 5 al 15%) y un bajo contenido de azufre (0 -1%). Los aromáticos equivalen del 25 al 40% del total de hidrocarburos. La densidad y la viscosidad son ligeramente mayores a los parafínicos.
- Clase nafténicos. Son poco abundantes; incluyen principalmente los aceites degradados que generalmente contienen menos del 20% de alcanos normales e hizo. Se originan de la alteración bioquímica de los aceites parafínicos y parafínicos-nafténicos, tienen un bajo contenido de azufre.
- Clase intermedia aromática. Consiste de aceites crudos que a menudo son pesados; las resinas y asfaltenos equivalen entre el 10 y el 30%, siendo algunas veces mayor. El contenido de azufre es mayor al 1%. Los aromáticos constituyen del 40 al 70% de los hidrocarburos comúnmente de los yacimientos, su peso específico es alto (mayor a 0.85).

• Clases aromáticos nafténicos y aromáticos asfálticos. Están representados principalmente por los aceites crudos alterados parafínicos, parafínicos-nafténicos e intermedios aromáticos. Son pesados y viscosos. El contenido de residuos más asfaltenos normalmente es superior al 25% y puede alcanzar hasta el 60%. El contenido relativo puede variar así como la cantidad de azufre de acuerdo con el crudo original.

Concentración en aceite crudo S - saturado. (210°C) A - aromático. + resinas y asfaltenos	Tipo de aceite crudo P - parafinas N - naftenos	Cantidad de azufre en el crudo (aproximada)
S > 50% A < 50%	P > N y P > 40%	Parafínico
	P <= 40% y N <= 40%	Parafínico-nafténico
	N > P y N > 40%	Nafténico
S < 50% A > 50%	P > 10%	aromático intermedio
	P <= 10%	N >= 25% aromático asfáltico
		N >= 25% aromático nafténico
		mayor al 1%
		1%

Figura 6.21 clasificación en un diagrama ternario de los tipos de crudos (Tissot, 1978).

En la figura 6.22 se representa mediante un diagrama ternario (Tissot, 1998) la composición de seis clases de aceites crudos de 541 campos petroleros.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

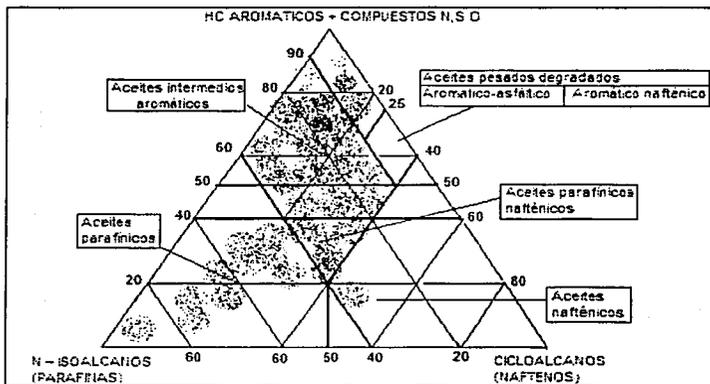


Figura 6.22 Diagrama ternario de seis clases de crudos, tomada de Tissot,1978.

En México por razones comerciales, se ha buscado mantener una producción equilibrada entre el crudo pesado o tipo Maya de 22°API, el crudo ligero o tipo Istmo de 33°API, y el crudo super ligero o tipo Olmeca de 38°API.

México cuenta con varios centros de refinación instalados a lo largo de la costa del Golfo de México, donde se localizan los yacimientos, así como en zonas de importancia industrial, actualmente están en operación siete refinерías localizadas en las siguientes localidades; Reynosa y Cd. Madero, Tamps.; Poza Rica y Minatitlán, Ver.; Salamanca, Gto.; Tula, Hgo.; Cadereyta, N.L. y en Salina Cruz, Oax.

### 6.3 El gas natural.

El gas natural es un energético de origen natural que llega directamente a los hogares, comercios e industrias por tuberías, de manera subterránea o por transporte en tanques. Esto permite que se pueda disfrutar el servicio de manera cómoda y segura, las 24 horas, todos los días del año; se consume en la mayoría de las casas tal y como se encuentra en la naturaleza, de ahí su nombre.

Es un combustible de origen fósil que se encuentra en el subsuelo, procede de la transformación de materia orgánica. Su composición incluye diversos

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

hidrocarburos gaseosos, con predominio del metano en una proporción aproximada del 90 por ciento. El gas natural es el combustible más puro y limpio que ofrece la Tierra, el proceso del gas natural se inicia con la extracción, continúa con el transporte y concluye con la distribución final al usuario. A lo largo de este recorrido, el gas natural conserva sus propiedades originales, ya que se distribuye sin transformación alguna. Para distribuir el gas natural se utilizan redes de polietileno, material de alta resistencia y durabilidad ampliamente utilizado en zonas sísmicas como son las ciudades de Tokio y San Francisco. Como el agua, el gas natural se distribuye bajo el suelo de muchas ciudades, a través de una red de tuberías cuyo mantenimiento es constante, y llega con toda seguridad hasta millones de hogares en todo el mundo.

Las propiedades del gas natural son:

- Es menos denso que el aire por que tiende a subir mientras, que el gas LP tiende a permanecer en las partes bajas.
- Es de combustión limpia.
- Es eficiente y abundante
- No tiene color ni olor se incorpora un componente químico (mercaptano) que le proporciona un olor característico.
- No es absorbente.
- No es corrosivo.
- No requiere de ningún proceso de transformación para su utilización.

El gas natural se puede encontrar en forma "asociado", cuando en el yacimiento aparece acompañado de petróleo, o gas natural "no asociado" cuando está acompañado únicamente por pequeñas cantidades de otros hidrocarburos o gases.

La composición del gas natural incluye diversos hidrocarburos gaseosos, (tabla 5.3) con predominio del metano, por sobre el 90%, y en proporciones menores etano, propano, butano, pentano y pequeñas proporciones de gases inertes como dióxido de carbono y nitrógeno.

Composición Típica del Gas Natural:

Hidrocarburo	Composición Química	Rango(en %)
Metano	CH <sub>4</sub>	91-95
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2-6
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	0-2
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0-2
Nitrógeno	N	0-1

Tabla 6.3 Composición del gas natural y otros gases.

El gas natural, una vez que se ha separado de la gasolina natural, contiene metano y cantidades cada vez menores de los homólogos C<sub>2</sub> – C<sub>4</sub>; el gas de algunas zonas contiene también nitrógeno y helio. Los puntos de ebullición difieren de los primeros alcanos, difieren mucho entre sí; también los puntos de ebullición del nitrógeno o helio son muy diferentes, debido a esto pueden separarse perfectamente los componentes de esta mezcla licuando y haciendo una destilación fraccionada, a presión, a baja temperatura. Se obtienen así una serie de productos puros, cuyos puntos de ebullición son: (Metano – 162°), etano (- 89°), propano (-42°) y helio (-269°). Los hidrocarburos obtenidos de esta manera, se convierten por craking en productos no saturados, muy interesantes en síntesis industriales.

Desde el punto de vista de su exploración se distinguen dos tipos de gas natural:

- Gas seco: es el gas natural constituido básicamente por metano, exento de condensados del tipo de la gasolina; el gas seco contiene menos de 0.1 galones de vapores líquidos en 1000 pies cúbicos de gas.
- Gas húmedo: es el gas natural que contiene metano e hidrocarburos gaseosos más pesados, presenta aproximadamente de 0.3 a más galones de líquido por cada 1000 pies cúbicos del gas. En la figura 6.23 se representa el porcentaje de hidrocarburos que contienen el gas natural y gas húmedo.

	Gas húmedo	Gas seco
Metano	84.6	96.00
Etano	6.4	2.00
Propano	5.3	0.60
iso - butano	1.2	0.18
n - butano	1.4	0.12
iso		
pentano	0.4	0.14
n - pentano	0.2	0.06
Hexanos	0.4	0.10
Heptanos	0.1	0.00

Figura 6.23 Hidrocarburos como gases típicos (húmedos y secos).

Existen diferentes tipos nombres para denominar al gas dependiendo de sus características y usos, los cuales han sido clasificados de acuerdo al IMP como:

- Gas a ventas: Gas crudo, después de ser procesado para remover LPG, condensado y bióxido de carbono; el gas a ventas consiste de metano y etano.
- Gas amargo: Gas natural que contiene cantidades significativas de ácido sulfhídrico, este gas se trata usualmente con trietanolamina para remover los elementos indeseables.
- Gas asociado: Gas natural encontrado en asociación con aceite en un yacimiento, ya sea disuelto en el aceite o como una capa arriba del aceite (casquete).
- Gas Combustible: Se refiere a combustibles gaseosos, capaces de ser distribuidos mediante tubería, tales como gas natural, gas líquido de petróleo, gas de hulla y gas de refinería.
- Gas de carbón: Gas elaborado mediante la destilación destructiva de carbón bituminoso. Los principales componentes son metano (20 a 30%)e hidrógeno (alrededor de 50%).
- Gas discontinuo: Gas disponible sujeto a acuerdos que permiten la terminación o la interrupción de la entrega por los abastecedores, usualmente durante un número limitado de días en un periodo especificado. Lo opuesto es "gas continuo".
- Gas doméstico: Gas enviado a consumidores desde una planta de gas. Puede comprender gas manufacturado, así como gas natural para enriquecimiento.

- Gas dulce: Gas natural que contiene cantidades muy pequeñas de ácido sulfhídrico y bióxido de carbono. El gas dulce reduce las emisiones de bióxido de azufre a la atmósfera.
- Gas embotellado: LPG almacenado en estado líquido a presión moderada en contenedores de acero.
- Gas en solución: Gas natural disuelto en el crudo dentro del yacimiento.
- Gas húmedo: a).- También se denomina gas rico, es decir, gas que contiene hidrocarburos licuables a temperatura y presión ambiente. b).- Gas que contiene vapor de agua.
- Gas inerte: Un gas químicamente inerte, resistente a reacciones químicas con otras sustancias
- Gas licuado de petróleo (Liquefied Petroleum Gas - LPG): El LPG está compuesto de propano, butano, o una mezcla de los dos, la cual puede ser total o parcialmente licuada bajo presión con objeto de facilitar su transporte y almacenamiento. El LPG puede utilizarse para cocinar, para calefacción o como combustible automotriz.
- Gas natural crudo: Gas natural que contiene impurezas y sustancias indeseables tales como: agua, nitrógeno, bióxido de carbono, ácido sulfhídrico gaseoso y helio. Estos se remueven antes de que el gas se venda.
- Gas natural licuado: Gas natural que para facilidad de transportarlo ha sido licuado mediante enfriamiento a aproximadamente menos 161°C a presión atmosférica. El gas natural es 600 veces más voluminoso que el gas natural licuado (LNG).
- Gas pobre o gas seco: Gas con relativamente pocos hidrocarburos diferentes al metano. El poder calorífico es típicamente alrededor de 1,000 Btu/pié cúbico estándar, a menos que esté presente una proporción significativa de gases que no sean hidrocarburos.
- Gas rico: Gas predominantemente con metano, pero con una proporción relativamente alta de otros hidrocarburos. Muchos de estos hidrocarburos normalmente se separan como líquidos del gas natural.

- Gas seco: a).- Lo mismo que gas pobre, o sea que no contiene hidrocarburos que se licuarán a temperatura y presión ambiente. b).- Gas que no contiene vapor de agua, o sea gas "sin agua".
- Gas sintético: Gas rico en metano producido a partir de aceite o carbón que tiene las mismas características básicas y composición química que el gas natural. Después de tratamiento para eliminar bióxido de carbono es adecuado para servicio doméstico, como gas de bajo poder calorífico.

### 6.5 Hidratos de metano.

La superficie de la Tierra se forma por continentes, mares y océanos, siendo los últimos los que cubren mayor área, ya que representan más de 71% de la superficie del globo terrestre. En los mares y océanos se tienen numerosos y cuantiosos recursos naturales útiles a la sociedad, los cuales en algunos casos, son susceptibles de explotarse con rendimiento económico, con su respectivo impacto al medio ambiente. Con la investigación de las últimas décadas se ha demostrado que el piso marino tiene una variada topografía con accidentes, como fosas oceánicas, dorsales, mesetas, colinas y llanuras, donde han ocurrido distintos procesos geológicos por lo que se tiene gran variedad de sedimentos, rocas minerales. En estos materiales se han reconocido importantes yacimientos minerales metálicos y no metálicos. También se han identificado zonas potenciales de acumulación de gas, aceite e hidratos de metano.

Tanto en aguas someras como profundas en distintas latitudes se encuentran numerosos recursos naturales que podrían ser de gran utilidad para la sociedad. México, tiene grandes áreas por explorar y explotar dentro de su Zona Económica Exclusiva, en aguas con diferente batimetría se han reconocido sitios con gran potencial de reservas minerales e hidrocarburos. En el Golfo de México, se encuentran importantes volúmenes de sedimentos del Paleógeno y Neógeno que tienen potencial generador y almacenador de hidrocarburos por lo que se considera que existen volúmenes considerables (reservas posibles) de gas y/o aceite. Adicionalmente se considera la existencia de gran cantidad de hidratos de metano (hielos de metano), cuya explotación actual aún no es posible, pero con el

desarrollo de nuevas tecnologías que permitieran su extracción y distribución se tendría cubierta a corto y a largo plazo la mayor parte de la demanda futura de combustible.

Los hidratos de metano son moléculas de metano en estructuras de moléculas de agua que bajo las condiciones de presión y temperatura que existen en el talud y en las regiones polares (permafrost) se convierten en sustancias sólidas cristalinas (hielos de metano). En estas condiciones, el agua y gas metano reaccionan y se convierten en estado sólido cementando los granos de sedimentos presentes en estos ambientes. Estas formas cristalinas son estables a temperaturas cercanas a los 0°C, a presión moderada (por ejemplo, a profundidades de agua mayor a 300 metros); el gas metano se aloja en el interior de los cristales. En la figura 6.24 se observan las formas cristalinas de los hidratos de metano; en donde la figura A se muestra la Estructura I, está compuesta por 46 moléculas de agua por 8 moléculas de gas; B con la estructura I, con gas de metano en su interior; C. Corresponde con la Estructura II, compuesta por 136 moléculas de agua y por 24 moléculas de gas, y D. Estructura H, compuesta por 34 moléculas de agua y por 6 moléculas de gas.

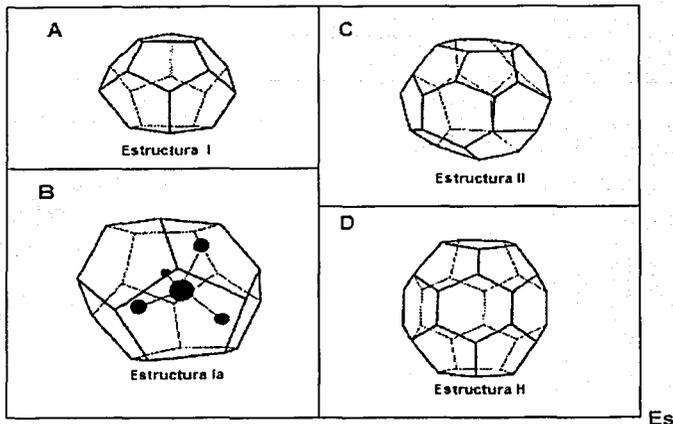


Figura 6.24 Representación esquemática de los hidratos de metano.

Los hidratos de metano se encuentran principalmente asociados a zonas donde ocurrió gran actividad microbiana en sedimentos de grano fino, ricos en materia orgánica. El potencial de reservas de gas que representan los hielos de metano, son tan grandes (10,000 Gigatoneladas) que cubrirían las demandas futuras de combustible de este siglo sin ningún problema. El inconveniente que en este momento se tiene para explotarlos, es que no hay tecnología adecuada para extraerlos con rendimiento económico y se desconoce el impacto ambiental que tendría la liberación de este gas invernadero a la atmósfera; se considera también que se modificarían las condiciones de estabilidad del talud y borde de plataforma, por lo que los fondos marinos también tendrían cambios. En la Zona Exclusiva de México se tienen sitios de interés por evaluar tanto en la parte norte del Golfo de México (frente al estado de Tamaulipas), como en el Océano Pacífico (frente a los estados de Oaxaca, Guerrero y Chiapas) y en el Golfo de California.

Estudiando los hidratos, se tiene que estos son muy importantes por una variedad de razones:

- Tienen potencial como un recurso de energía en el futuro.

- Son una fuente de metano a la atmósfera lo que permite entender mejor los cambios de clima.
- Afectan a los sedimentos en los que se encuentran.
- Las áreas con hidratos parecen ser menos estables que otras áreas del mar. Por consiguiente, la falta de estabilidad también podría ser un factor en cambio del clima.
- Los Hidratos actualmente bloquean las tuberías de los pozos de gas naturales. Este problema tiene un impacto negativo producción y transportar gas natural.
- Causan problemas en áreas de almacenamiento de gas, sobre todo en tiempo de frío. La investigación científica futura no sólo podría ayudar a resolver estos problemas, puede también revelar maneras en las que podrían usarse hidratos; otro aspecto relevante es que puedan aumentar los volúmenes de gas en almacenamiento y/o reducir los costos.

#### 6.5.1 Formación de los hidratos.

Hay dos procesos por los que se forman hidratos, proceso orgánico y escapes de gas.

· Orgánico - El hidrato de gas más natural se forma del metano biogénico, excretado por bacterias que se alimentan de materia orgánica o que murió en el océano. Este tipo de hidrato se concentra donde hay una acumulación rápida de partículas y donde ocurre acumulación rápida de sedimentos (qué protege de la oxidación).

· Escapes de gas - los Hidratos también se forman cuando las fallas o discontinuidades permiten al gas natural (o otros gases) emigrar de más profundo dentro de la corteza de la Tierra a la superficie del lecho marino a los lugares con temperatura apropiada y adecuados niveles de presión. Estos procesos también pueden originar hidratos en el permafrost, que actúa como una cubierta para prevenir migración ascendente de gas más allá en la atmósfera.

Los Científicos creen que el hidrato de gas natural se forma del metano biogénico (producido por bacterias), y que por consiguiente se concentra:

- 1) Donde hay una acumulación rápida de material orgánico muerto (de que las

bacterias generan metano).

- 2) Donde hay una acumulación rápida de sedimentos que protegen el material de la oxidación.

Los Hidratos producidos por procesos orgánicos generalmente son muy puros; ellos tienden a contener sólo agua y metano; los Hidratos formados por escapes de gas tienen muchos gases mezclados además del metano. Si se incrementa la temperatura del hielo, cambia y se libera una cantidad considerablemente de gas; teóricamente un centímetro cúbico de puro hidrato del metano debe rendir aproximadamente 164 centímetros cúbicos de metano y 0.84 cubicentímetros de agua.

Debido a la naturaleza del almacenamiento de metano en hidratos, este recurso ofrece un potencial inmenso de gas natural. Los hidratos son una fuente energética alternativa muy importante, ya que duplican las reservas actuales de hidrocarburos (gas y aceite).

Las reservas de Gas Natural están principalmente localizados en Rusia y Medio Oriente.

EU destinó invertir 50 M Dlls en el 2003, en su programa de hidratos de metano. Según la Japan National Oil Corporation (JNOC), México tiene un área potencial de hidratos de metano en el Pacífico y en el Golfo de México de 19,000km<sup>2</sup>. En el sur de México frente a las costas de Guerrero y Michoacán, los griegos obtuvieron una muestra (núcleo) con 99% de impregnación de metano.

México tiene muchos litorales, áreas marinas someras y profundas dentro de su Zona Económica Exclusiva, que se deben conocer y evaluar por profesionales especialistas en distintas áreas, para disponer la información suficientes y de calidad sobre los ecosistemas, las reservas de minerales y de hidrocarburos que puedan ser explotados en el futuro.

**CAPITULO VII. LAS ROCAS GENERADORAS EN MEXICO.**

Los estudios geoquímicos indican que el petróleo y gas que se produce en México ha sido generado, principalmente, por lutitas calcáreas y calizas arcillosas del Jurásico Superior, y en menor proporción por las rocas generadoras del Terciario y Cretácico.

En la Cuenca del Sureste, la más importante por su producción y reservas, el petróleo fue generado por las calizas arcillosas del Tithoniano, mientras que en Tampico-Misantla, segunda en importancia, el petróleo del Mesozoico proviene de las formaciones Tamán y Pimienta del Kimmeridgiano y Tithoniano, respectivamente. En ambos casos, el kerógeno es predominantemente del tipo II. No se tienen indicios definitivos sobre el origen del gas y condensado que producen el Paleoceno, Eoceno y Oligoceno en la Cuenca de Burgos, pero por sus características geológicas se deduce que provienen de las mismas lutitas terciarias encajonantes, ya que el Jurásico Superior se encuentra a grandes profundidades y no se concibe una migración vertical a través de los potentes espesores arcillosos sobreyacentes. Igual consideración se hace para el gas terciario de la Cuenca de Veracruz, genéticamente relacionados con las lutitas del Mioceno, ricas en kerógeno tipo III.

En la provincia gasífera de Sabinas, la generación se adjudica a las lutitas del Kimmeridgiano-Tithoniano con kerógeno tipo II, actualmente sobremaduro. Finalmente, en la Sierra de Chiapas, nueva provincia petrolífera de México, productora de aceite y condensado en una secuencia calcárea – evaporítica de Cretácico, las rocas generadoras probablemente corresponden a delgados horizontes arcillosos intercalados en las mismas facies lagunares.

El territorio mexicano está cubierto por gruesas secuencias sedimentarias en un 75% de su superficie, sin embargo, la producción mayoritaria de petróleo y gas se restringe a las cuencas de la Planicie Costera del Golfo de México (figura 7.1) con excepción de los yacimientos de gas de la Cuenca de Sabinas y los yacimientos recientemente descubiertos de aceite y condensado de la Sierra de Chiapas. También se conoce la presencia de gas y condensado en el Golfo de California, pero aún no se explota ni se conoce el volumen de reservas.



Figura 7.1 Principales cuencas sedimentarias de interés petrolero (González y Holguín 1991).

### 7.1 CUENCA DE BURGOS.

La cuenca de Burgos, productora de gas y concentrado en areniscas del Paleoceno, Eoceno, Oligoceno y Mioceno, contiene hidrocarburos que equivalen al 2.5% de los 66.450 millones de barriles de las reservas probadas de México (Pemex 1990), siendo su producción acumulada, desde que se inició su explotación en 1943 hasta fines de 1990, de  $5.3 \times 10^6 \text{ m}^3$  ( $33.7 \times 10^6 \text{ bl}$ ) de líquidos y  $143 \times 10^9 \text{ m}^3$  ( $5,040.3 \times 10^9 \text{ pies}^3$ ) de gas. (Figura 7.2).

De acuerdo a la edad de los almacenes, en esta cuenca se diferencian cinco franjas de dirección norte-sur correspondientes al Jurásico – Cretácico, Paleoceno, Eoceno, Oligoceno y Mioceno, siendo la más importante la del Oligoceno, por su volumen de producción.

Los hidrocarburos provienen, principalmente de arenas terciarias (figura 7.3) encajonadas por potentes paquetes de arcillas, algunas de las cuales contienen cantidades importantes de carbono orgánico. Los yacimientos del Mesozoico son pocos significativos, aún cuando las rocas del Jurásico Superior y Cretácico Superior presentan características de generadoras.

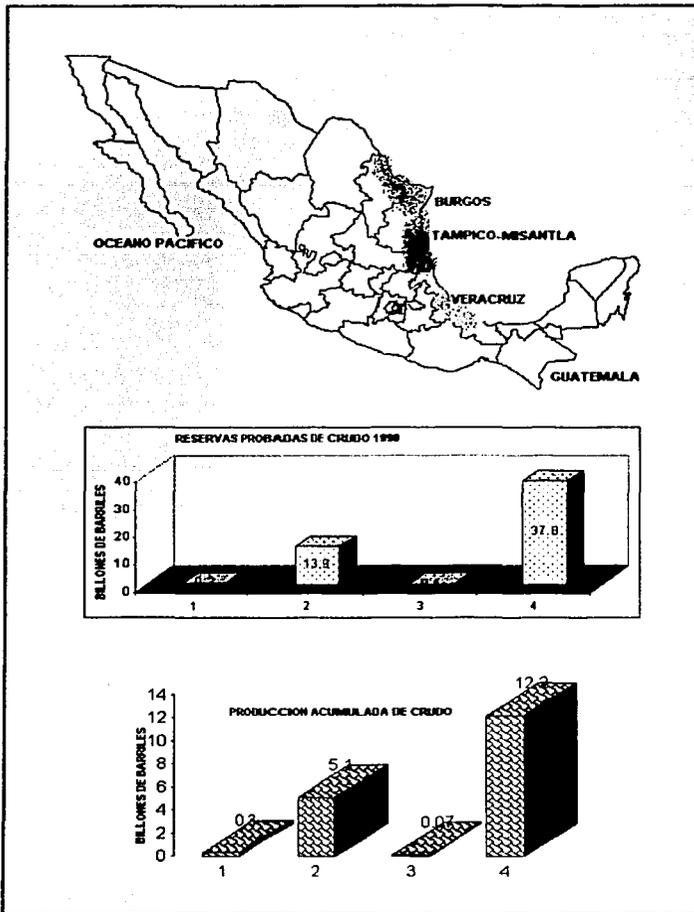


Figura 7.2 Producción y reservas de petróleo de las Cuencas de Burgos, Tampico-Misantla, Veracruz y Sureste (González y Holguín, 1991).

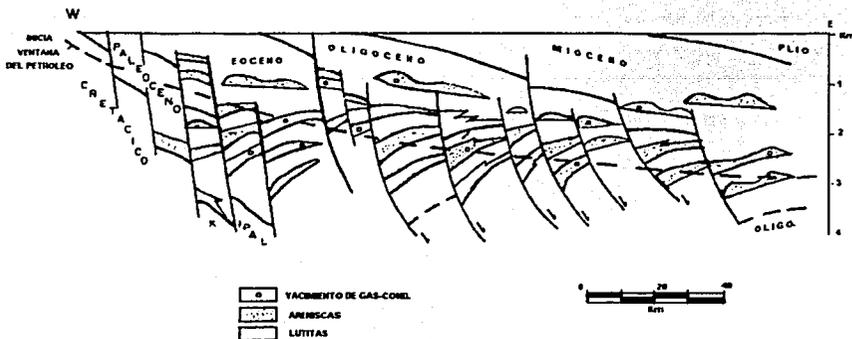


Figura 7.3 Sección transversal esquemática y condiciones de madurez de la Cuenca de Burgos (Tomada de González y Holguín 1990).

### 7.1.1 Jurásico Superior.

El Mesozoico se ha alcanzado solamente en los bordes occidental y sur de esta cuenca. Los estudios geoquímicos indican que en las calizas arcillosas y lutitas calcáreas del Jurásico Superior (Formación Pimienta) predominan cantidades de carbono orgánico superiores al 1%; algunas muestras, pese a su madurez, alcanzan a generar más de 5 miligramos de hidrocarburos por gramo de roca. Los carbonatos y arcillas de esta edad fueron depositadas sobre un mar abierto, extenso, con aguas tranquilas, que proporcionan las condiciones anóxicas para la conservación de la materia orgánica marina que aún contiene (tipo III).

### 7.1.2 Cretácico Superior.

Dentro de la secuencia del Cretácico, las formaciones Eagle Ford y agua Nueva (Turoniano), San Felipe y Méndez presentan un comportamiento geoquímico semejante en cuanto a su contenido de carbono orgánico (superior a 1%), y valores considerables de S<sub>2</sub> (hidrocarburos potenciales) en una buena proporción de muestras (figura 7.4), lo que permite catalogarlas como rocas generadoras. Estas rocas consisten de calizas arcillosas y lutitas calcáreas depositadas sobre una plataforma abierta y extensa, durante las últimas etapas

de la transgresión regional que cubrió gran parte del actual territorio mexicano.

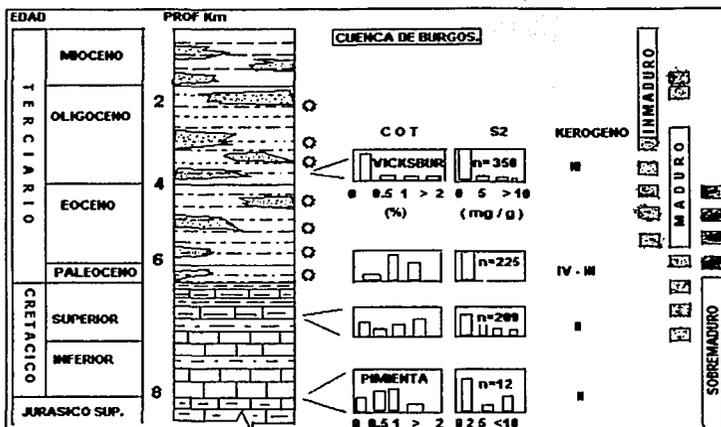


Figura 7.4 Características estratigráficas y geoquímicas de la Cuenca de Burgos (Tomada de González y Holguín 1991).

### 7.1.3 Terciario.

Entre las lutitas y areniscas del Paleoceno y Eoceno, se encuentran valores de carbono orgánico superiores a 1% en las formaciones Midway del Paleoceno y Recklaw y Cook Mountain del Eoceno. En el marco de una regresión general terciaria que rompe con la sedimentación de carbonatos mesozoicos, se inicia una fuerte subsidencia y sedimentación de terrígenos finos y arenosos acompañados de materia orgánica marina y continental (tipos III y IV) en condiciones marinas a mixtas, cuyo potencial generador es irrelevante. No obstante, las facies arenosas de estas formaciones producen gas y condensado, al igual que las de la Formación Vicksburg del Oligoceno inferior, cuya parte arcillosa sí detenta ligero potencial generador (S<sub>2</sub>) en algunas de las muestras, debido a la probable presencia de cantidades subordinadas de kerogeno tipo II.

#### 7.1.4 Conclusiones sobre la Cuenca de Burgos.

La Cuenca de Burgos inicia su formación con la transgresión regional provocada por la apertura del Golfo de México; sin embargo, su máxima sedimentación la alcanza durante la regresión del Terciario, que estuvo acompañada por fallamientos tensionales que provocaron una fuerte subsidencia conjugada a un gran depósito de terrígenos arcillo-arenosos que más tarde produjeron un sistema de generación de hidrocarburos.

La presencia de gas y condensado en los lentes y capas arenosas encajonados por potentes cuerpos de arcilla hacen suponer que la generación fue producto de las propias arcillas que, no obstante su limitado potencial, fueron capaces de generar y expulsar cantidades también limitadas de hidrocarburos gaseosos. El fallamiento originalmente normal y posteriormente de crecimiento fue tan intenso durante todo el Terciario, que provocó el depósito de terrígenos, cuyo espesor se calcula superior a 8,000 metros en el epicentro de la cuenca, lo que implica una excesiva transformación térmica para las rocas mesozoicas y aún para las del Terciario, a causa de un gradiente geotérmico, relativamente alto que en general supera los 26°C/km.

#### 7.2 Cuenca Tampico- Misantla.

En la Cuenca Tampico-Misantla se diferencian tres provincias productoras de aceite: la cuenca, propiamente dicha, la faja de oro y el Paleocanal de Chicontepec. Su producción acumulada desde principios de siglo, cuando se inició su explotación, es de  $814 \times 10^6 \text{ m}^3$  ( $5119 \times 10^6 \text{ bl}$ ) de crudo y  $187 \times 10^9 \text{ m}^3$  ( $6604 \times 10^9 \text{ pies}^3$ ) de gas.

En la Cuenca Tampico - Misantla se conservan el 30% de las reservas nacionales. La producción en el Paleocanal de Chicontepec proviene de terrígenos arenosos de edad terciaria.

En la Faja de Oro, producen las calizas arrecifales y periarrecifales del Cretácico (figura 7.5) y en la cuenca, las facies calcareníticas y terrígenas del Jurásico Superior, además de las calizas fracturadas del Cretácico Inferior.

Los estudios geoquímicos indican que las rocas generadoras más importantes son las del Jurásico Superior, en segundo término se tienen las secuencias arcillosas del Aptiano y Turoniano.

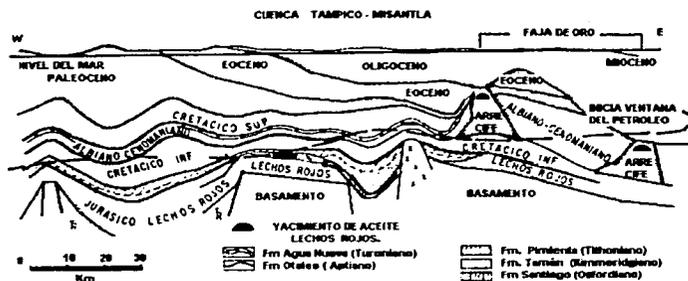


Figura 7.5 Sección transversal esquemática y condiciones de madurez de la Cuenca Tampico-Misantla (Tomada de González y Holguín, 1991).

### 7.2.1 Jurásico Superior.

De acuerdo a Gozález y Holguín, 1991, el contenido de carbono orgánico es superior al 1% en el 57% las 309 muestras analizadas de las formaciones Santiago, Tamán y Pimienta, del Oxfordiano, Kimmeridgiense y Tithoniano, respectivamente (figura 7.6). El 40% de ellas presenta un potencial de generación ( $S_2$ ) superior a 2.5 mg/g. La formación Santiago del Oxfordiano es una unidad con fuerte potencial, debido a que cuando se acumuló la aún incipiente transgresión marina cubría sólo algunos restringidos depocentros en los que se acumulaban carbonatos y arcillas bajo aguas someras de muy baja energía, propicias para la preservación de materia orgánica de buena calidad (I y II), pero con aportaciones de materia orgánica continental (III), por la cercanía de amplias áreas positivas circundantes.

Durante el Kimmeridgiense, la transgresión cubrió casi toda el área Tampico-Misantla, continuando la sedimentación de lodos calcáreo-arcillosos (Formación Tamán), adecuados para la conservación de materia orgánica, pero distribuidos solamente en el 50% de una cuenca. Esta secuencia conserva aún cantidades importantes de carbono orgánico e hidrocarburos potenciales ( $S_2$ ). Fue hasta el Tithoniano cuando la cuenca quedó completamente cubierta, con

el predominio de ambientes tranquilos de mar abierto, en los cuales se depositaron carbonatos y arcillas con materia orgánica marina (tipo II) que dieron origen a la Formación Pimienta, la cual presenta, actualmente, un potencial S<sub>2</sub> superior a 2.5 mg/g, en el 45% de las 120 muestras analizadas. (González y Holguín, 1991).

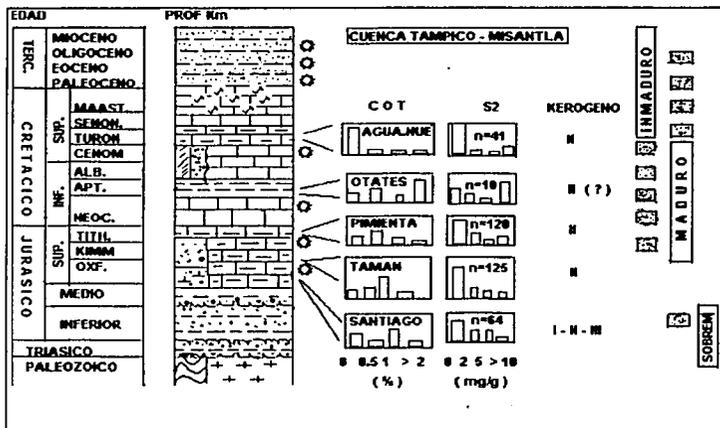


Figura 7.6 Características estratigráficas y geoquímicas regionales de la Cuenca Tampico-Misantla (Tomada de González y Holguín, 1991).

7.2.2 Cretácico Inferior.

El Horizonte Otates del Aptiano Superior está constituido por calizas arcillosas gris oscuro, laminares, que denotan un ambiente de cuenca de baja energía. De diez muestras analizadas, cuatro presentan valores superiores al 2% de carbono orgánico y más de 10 mg de hidrocarburos por gramo de roca, lo que las califica como rocas con un fuerte potencial generador. Sin embargo, su espesor promedio inferior a diez metros le resta importancia económico petrolera, además de su inmadurez en la mayor parte de la cuenca.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 7.2.3 Cretácico Superior.

Del Cretácico Superior, la Formación Agua Nueva (Turoniano) mostró valores de carbono orgánico superiores al 1% en 11 de las 41 muestras analizadas, aunque sólo 6 superan los 2,5 mg/g de S<sub>2</sub> (González y Holguín, 1991). Los estudios ópticos indican que contiene predominantemente kerógeno tipo II. Todo esto, permite definir a esta formación, aún inmadura, como potencialmente generadora de regular importancia, en la mayor parte de la Cuenca Tampico-Misantla.

### 7.2.4 Conclusiones sobre la Cuenca Tampico-Misantla.

Las mejores rocas generadoras corresponden a las calizas arcillosas y lutitas calcáreas del Jurásico Superior, las cuales se encuentran generalmente maduras. Estudios indirectos indican que la generación se inició a partir del Eoceno y Oligoceno en las áreas más profundas y/o calientes, mientras que en la mayor parte de la cuenca, la generación masiva ocurre durante el Mioceno, a pesar de lo corto de la pila sedimentaria (2 a 3 km), a causa del gradiente geotérmico relativamente alto que oscila entre 25 y 30°C/km en la mayor parte de la cuenca.

Diversas correlaciones roca-aceite concuerdan en que las rocas que dieron origen a los aceites de esta cuenca corresponden, principalmente, a las formaciones Tamán y Pimienta del Kimmeridgiano y Tithoniano respectivamente. Aún cuando es importante la capacidad generadora de la formación Santiago del Oxfordiano, su distribución restringida permite considerar que estas rocas aportaron sólo cantidades limitadas de hidrocarburos a las trampas petroleras.

### 7.3 Cuenca de Veracruz.

La cuenca de Veracruz ha producido continuamente desde su descubrimiento en 1953, alrededor de  $11.4 \times 10^6 \text{ m}^3$  ( $71.5 \times 10^6$  bls) de crudo, el cual se extrae, principalmente, de calizas del Albiano-Cenomaniano (Formación Orizaba) y del Campaniano -Maastrichtiano (formaciones Méndez y San Felipe). Por otra parte, las lentes arenosas del Mioceno han producido aproximadamente  $12 \times 10^9 \text{ m}^3$  ( $427.9 \times 10^9$  pies<sup>3</sup>) de gas. Las reservas probadas de esta cuenca corresponden al 0.5% de las reservas totales de México. En esta cuenca se diferencian dos elementos geológicos conocidos como Cuenca Terciaria de

Veracruz, al oriente, y Plataforma de Córdoba, al occidente (figura 7.7). En la plataforma de Córdoba, los carbonatos del Mesozoico fueron fuertemente plegados, dislocados con fallas inversas y erosionados en el lapso Paleoceno Eoceno Medio, por lo que la poca potente sedimentación terrígena post-eocénica descansa en discordancia angular sobre el Mesozoico. En la cuenca de Veracruz, el espesor del Mesozoico es menor mientras que en el epicentro la cubierta de terrígenos terciarios se incrementa fuertemente hasta 8 ó 9 km en el epicentro.

El conocimiento geoquímico actual de esta cuenca no nos permite saber con seguridad el origen de los aceites de los yacimientos del Cretácico ni de los gases que se obtienen del Mioceno, pero las rocas que presentan mayor contenido orgánico se han detectado a nivel Jurásico Superior, y en menor proporción en secuencias del Turoniano y Mioceno Inferior y Medio.

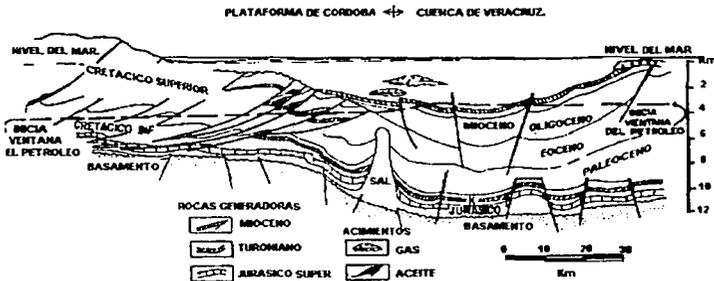


Figura 7.7 Sección transversal esquemática y condiciones de madurez de la Cuenca de Veracruz (Tomada de González y Holguín, 1991).

### 7.3.1 Jurásico Superior.

El Jurásico Superior ha sido alcanzado por la perforación de pozos sólo en los extremos menos profundos de la Plataforma de Córdoba. Los estudios de pirólisis y ópticos que presentan algunas muestras corresponden con concentraciones de carbono orgánico e hidrocarburos indican secuencias potenciales (S<sub>2</sub>) de 2% y 5mg/g, respectivamente (figura 7.8). Lo anterior da



IV. Hacia el oriente, los pozos no la han cortado, pero se le considera sobremadura.

### **7.3.3 Oligoceno.**

Las rocas del Oligoceno consisten de lutitas marinas gris obscuro, intercaladas con areniscas. Presentan valores altos de Carbono orgánico, en su mayoría superiores al 1%, que en muchas ocasiones sobrepasan el 2%. Más de la tercera parte de las 133 muestras pirolizadas superan los 5 mg/g de S<sub>2</sub>, lo que da idea de su buen potencial generador (González y Holguín, 1991) En la Plataforma de Córdoba, estas rocas se encuentran inmaduras, pero hacia el oriente, en la Cuenca Terciaria de Veracruz, se encuentran maduras y sobremaduras.

La materia orgánica predominantemente es de los tipos II y III.

### **7.3.4 Mioceno Inferior y Medio.**

La información geoquímica del Mioceno indica que las formaciones La Laja, Depósito y Encanto, de dicha edad, contienen cantidades importantes de Carbono orgánico que promedian arriba del 5%, existiendo valores de hasta 12%. Estas formaciones están constituidas por lutitas gris y gris verdosos, cuyo espesor supera los 1,200 m. Es la unidad con valores más altos de Carbono orgánico que se conoce en México; sin embargo, su tipo de materia orgánica es de un kerógeno continental (III) e inerte (IV), indicado por pirólisis que produce cantidades poco mas significativas de hidrocarburos gaseosos.

### **7.3.5 Conclusiones sobre la cuenca de Veracruz.**

Las grandes profundidades en las que yacen las rocas del Jurásico Superior han impedido definir con claridad su potencial generador aunque considerando su importancia regional en el Golfo de México, es probable que los hidrocarburos que se extraen del Mesozoico de esta cuenca tengan relación genética con dichas rocas.

De acuerdo a cálculos indirectos de evolución térmica, las rocas del Jurásico Superior habrían ingresado a la ventana del petróleo durante el Paleoceno en la Plataforma de Córdoba y actualmente, se encontrarían al inicio de la metagénesis. Hacia el depocentro de la Cuenca de Veracruz, se considera que las condiciones de evolución térmica han sido severas para esta unidad.

Las secuencias arcillosas del Mioceno Inferior y Medio presentan

intercalaciones de areniscas que producen gas y algo de condensado, cuyo origen no ha sido establecido. Existe la posibilidad de que estos hidrocarburos hayan sido generados in situ por las rocas encajonantes, dado su carácter generador de gas, pero no se descarta que provengan de rocas más antiguas y que por migración vertical se hayan alojado en las areniscas del Mioceno.

Los gradientes geotérmicos están claramente relacionados a la litología y espesores de la columna sedimentaria, de tal manera que hacia el centro de la Cuenca de Veracruz, donde predominan terrigenos terciarios, los gradientes varían de 20 a 24°C/km, mientras que hacia la Plataforma de Córdoba, el desarrollo de carbonatos y evaporitas provoca gradientes de 16 a 20°C/km.

#### **7.4 Cuencas del Sureste.**

Bajo el nombre de Cuencas del Sureste se incluye a las provincias mejor conocidas como Chiapas-Tabasco, Salina del Istmo y Macuspana, además de la parte marina conocida como Sonda de Campeche.

Las Cuencas del Sureste constituyen el área petrolera más importante de México con una extracción diaria de 2,414.379 de barriles, que constituyen el 96% de la producción diaria promedio de México. Esta cuenca contiene el 67% de los  $10,565 \times 10^9 \text{ m}^3$  (66,450 millones de barriles, 1989) de reservas probadas nacionales. Su producción acumulada asciende a  $1,934 \times 10^6 \text{ m}^3$  (2,164,5  $\times 10^6$  bls), de crudo y a  $543 \times 10^9 \text{ m}^3$  (19,169  $\times 10^9$  pies<sup>3</sup>) de gas. Aún cuando de ésta cuenca se han explotado los yacimientos del Terciario desde principios del siglo, la producción acumulada se debe, principalmente, a la explotación de los campos de Chiapas-Tabasco, descubiertos en 1972 y de la Sonda de Campeche, en 1976. La evaluación de 5,981 muestras analizadas por pirólisis y algunas de ellas por estudios ópticos por luz transmitida (González y Holguín, 1991) permitió definir algunas unidades como generadoras de hidrocarburos, entre las que destacan por su alto contenido de carbono orgánico e hidrocarburos potenciales, en primer término, las Tithoniano y, en segundo, las del Eoceno Medio, Oligoceno Inferior y Mioceno Medio, (Figura 7.9).

##### **7.4.1 Jurásico Superior.**

Las rocas del Jurásico Superior (Tithoniano) presentan valores de carbonoorgánico que en su mayor parte superan el 1% y la cuarta parte de las

muestras indica un potencial superior a 5 miligramos de hidrocarburos por gramo de roca. Los estudios químicos y ópticos demuestran que contienen kerógeno de tipos I y II, predominantemente. Están constituidas, principalmente, por calizas arcillosas negras y gris oscuro, depositadas en mar abierto con condiciones anóxicas, durante una transgresión regional que se inició en el Jurásico Medio. Su espesor promedio es de 220m.

Actualmente el Tithoniano se encuentra en condiciones de madurez en la mayor parte de la cuenca, aunque hacia el oriente, en la plataforma de Yucatán se toma inmaduro hasta su acuñaamiento echado arriba por el acortamiento de la columna sobreyacente al igual que en un graben del Plioceno-Pleistoceno hacia el centro de la Sonda de Campeche. Hacia el sur, en las estribaciones de la Sierra de Chiapas las condiciones de maduración se toman severas por el fuerte sepultamiento que sufre la columna por una mayor sedimentación cretácica, además de que disminuye su potencial generador. Debido a su madurez, el Tithoniano presenta presiones anormalmente altas, principalmente en la Sonda de Campeche y en la parte norte de Chiapas-Tabasco, provocadas por la generación de hidrocarburos.

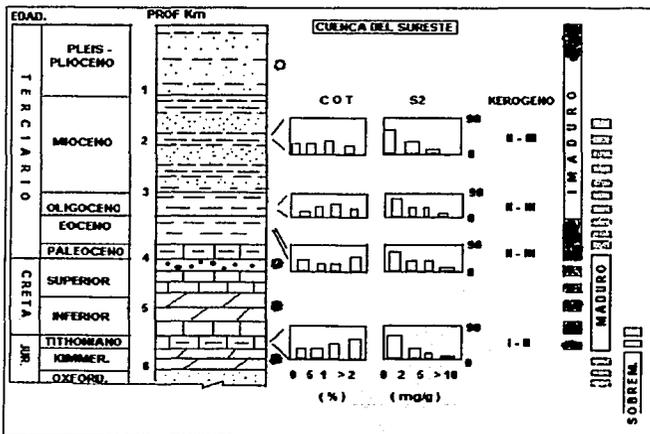


Figura 7.9 Características estratigráficas y geoquímicas regionales de las Cuencas del Sureste (Tomada de González y Holguín, 1991).

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

**7.4.2 Eoceno Medio.**

De 202 muestras analizadas del Eoceno Medio (González y Holguín, 1991) 113 contienen más del 1% de carbono orgánico y 48 generaron por pirólisis en laboratorio más de 5mg de hidrocarburos por gramo de roca (figura 7.10), lo que indica que es potencialmente generador, pero su evolución térmica es aún inadecuada, ya que se encuentra inmadura prácticamente en toda el área, a excepción de las áreas con alto gradiente geotérmico y/o fuerte sepultamiento, como es el caso de la Cuenca de Macuspana.

Las secuencias sedimentarias del Eoceno Medio se caracterizan, principalmente, por lutitas y lutitas bentónicas gris verdoso, calcáreas, depositadas durante una etapa regresiva regional que se inicia con el Terciario. Su espesor promedio es de 100m y en ella predomina el kerógeno tipo II.

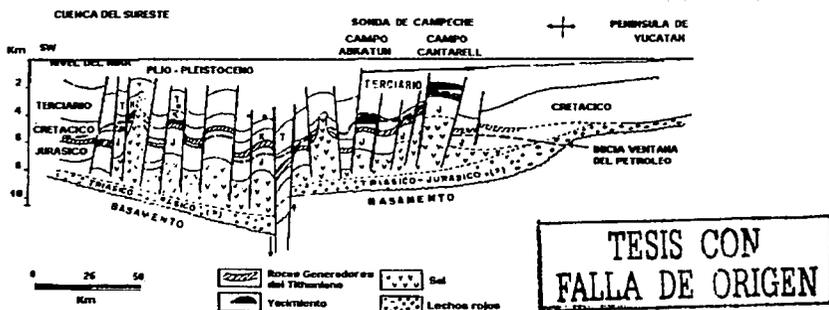


Figura 7.10 Sección transversal esquemática y condiciones de madurez de la Cuenca del Sureste (Tomada de González y Holguín, 1991).

**7.4.3 Oligoceno Inferior.**

El Oligoceno Inferior corresponde con una secuencia netamente arcillosa, constituida por lutita plástica gris, con valores superiores al 1% de carbono orgánico en el 60% de las 196 muestras analizadas y mayores a 2.5 mg/g de S<sub>2</sub> en el 48% de las mismas, (González y Holguín, 1991) lo cual refleja su

potencial generador, aunque se encuentra generalmente inmaduro. Los estudios ópticos indican la predominancia de kerógenos tipos II y III. Los espesores varían desde cero, en el centro de la Sonda de Campeche, hasta 400 m, al sur. Por su litología arcillosa y la rápida sedimentación subsecuente del Mioceno y Plio-Pleistoceno, las arcillas del Oligoceno y parte del Eoceno se encuentran, en la actualidad, fuertemente sobrepresionadas.

#### **7.4.4 Mioceno Medio.**

El Mioceno Medio, aún cuando presenta valores altos de carbono orgánico, no refleja un potencial generador importante según los valores de  $S_2$ , debido a la fuerte influencia de material orgánico continental tipo III. Su evolución térmica, en general, es insuficiente, aunque en algunas localidades de fuerte sepultamiento y/o altos gradientes geotérmicos llegan a estar maduro, como es el caso de la Cuenca de Macuspana.

#### **7.4.5 Conclusiones sobre la Cuenca del Sureste.**

Se tienen yacimientos de aceite y gas en areniscas del Mioceno en las Provincias Salina y Macuspana, pero su origen no se ha establecido con seguridad, ya que existe la probabilidad de que algunos de ellos pudieran haber sido generados por las rocas del Jurásico Superior, aunque no se descarta, sobre todo en el caso del gas, una generación temprana a partir del kerógeno terciario.

Las rocas generadoras más importantes que se conocen en ésta área y que han aportado la mayor cantidad de aceite y gas que de aquí se extrae, son las de calizas arcillosas del Tithoniano, que por efectos de migración vertical hacia arriba o hacia abajo han rellenado las trampas del Kimmeridgiano, Cretácico Medio y brechas del Cretácico Superior-Paleoceno. Por tratarse de una cuenca de alta impedancia con fallamientos predominantemente subverticales, se propicia la migración vertical e imposibilita la migración lateral a grandes distancias, (Figura 7.10).

La lenta subsidencia predominó durante el Cretácico, e incluso hasta el Oligoceno, lo que permitió que las rocas generadoras del Tithoniano se mantuvieran latentes hasta que la rápida subsidencia y sedimentación del Mioceno y Plio-Pleistoceno las empujaron a temperaturas adecuadas para madurar (80-100°C), por lo que la generación de los aceites se produjo,

principalmente, durante el Mioceno al Plio-Pleistoceno.

Por otra parte, los bajos gradientes geotérmicos actuales que predominan en algunas áreas, permiten que se conserven hidrocarburos líquidos a profundidades superiores a seis kilómetros. El gradiente geotérmico promedio del área es de 23°C/km. En las áreas frías se considera que profundidades superiores a 7,000 m no será obstáculo para la preservación de hidrocarburos líquidos.

La conceptualización en tiempo y espacio que se tiene actualmente sobre los fenómenos de generación, migración y acumulación en esta cuenca, ha permitido discriminar las áreas no atractivas de las que sí tienen importancia petrolera, además de que con un alto grado de confiabilidad se ha podido pronosticar el tipo de hidrocarburos y su densidad API, aún antes de iniciar la perforación.

#### **7.5 Cuenca de Sabinas.**

La cuenca o (Golfo) de Sabinas es la única cuenca en explotación que no está situada en la Planicie Costera del Golfo de México. En ella se descubrió la presencia de gas seco en 1972, aunque en cantidades muy limitadas, ya que solamente contiene el 0.05% de las reservas totales probadas del país. Está constituida por rocas sedimentarias del Mesozoico, de las cuales producen gas seco las del Jurásico Superior y Cretácico Inferior. Las más altas concentraciones de carbono orgánico (>1%) se conocen en las formaciones La Casita y Pimienta del Kimmeridgiano-Tithoniano y La Peña del Aptiano Superior. En segundo término, con concentraciones promedio entre 0.5 y 1%, se encuentran las formaciones Eagle Ford del Turoniano y Upson del Campaniano que se ubican únicamente en el oriente de la Cuenca. En esta cuenca, el potencial generador ( $S_2$ ) es insignificante debido a la sobremadurez, especialmente de las rocas del Cretácico Inferior y más antiguas. Se considera que el gas de esta cuenca está genéticamente relacionado a las rocas del Jurásico Superior, las cuales iniciaron la generación desde fines del Cretácico Inferior, cuando aún no existían trampas y salieron de la ventana del petróleo a fines del Terciario. El hecho de que la generación anteceda a las trampas, indica que los primeros hidrocarburos se perdieron y sólo se preservó parte de los que se originaron en tiempos post-orogénicos, es decir, después del

Paleoceno-Eoceno.

### **7.6 Cuenca de la Sierra de Chiapas.**

La Sierra de Chiapas es la provincia petrolífera más recientemente descubierta en México. En 1986 se descubrió el Campo Nazareth de gas y condensado en una secuencia calcáreo evaporítica del Cretácico Inferior. Más tarde, en 1990, se descubrió la presencia de aceite en el Campo Lacantún, en litologías semejantes, pero pertenecientes al (Albiano –Cenomaniano).

Los análisis geoquímicos realizados en la secuencia de anhidritas, dolomías y calizas ligeramente arcillosas de estos yacimientos y de otros pozos aledaños, no ha permitido establecer sólidamente la presencia de rocas generadoras, aunque algunas muestras del Pozo Lacantún –1B contienen carbono orgánico entre 0.5 y 1% e hidrocarburos potenciales (S<sub>2</sub>) ocasionalmente superiores a 1mg/g, otorgándoles cierto potencial generador, pero no muy importante. La ausencia de Jurásico marino, en esta localidad, no da lugar a suponer que la generación provenga de dichas rocas, como el área cercana de las Cuencas del Sureste, sino que la presupone relacionada a las mismas facies lagunares y de supremarea del Cretácico. Los estudios de biomarcadores confirman que el aceite y condensado provienen de una secuencia evaporítica aún cuando no se ha establecido una correlación roca-aceite. De esto se deduce que los delgados horizontes calcáreos, ligeramente arcillosos, encajonados entre anhidritas; son los mismos generadores de los productos que almacenan.

#### **7.6.1 Cuenca de Golfo de California.**

La cuenca del Golfo de California, producto del rift que separa la Península de Baja California, aloja sedimentos terrígenos arcillo-arenosos del Mioceno al Reciente, cuyo espesor supera los 5,000 metros. En el Pozo Extremeño-1, único clasificado como productor, se estableció un flujo de 6.2 millones de pies cúbicos diarios de gas y 130 barriles de condensado en arenas del Pleistoceno-Reciente (?). Los estudios geoquímicos han definido la presencia de las rocas generadoras entre las lutitas del Mioceno, supuestamente los reponsables de la generación de dichos hidrocarburos, los cuales se originaron, recientemente, por el fuerte sepultamiento y los altos gradientes geotérmicos, superiores a 30°C/km y que llegan a alcanzar los 70°C en las zonas de apertura. En general, se considera que las condiciones adecuadas para la generación están

restringidas a los puntos calientes relacionados a dichas zonas de aperturas.

### **7.7 Cuencas de Chihuahua y Tlaxiaco.**

En las cuencas de Chihuahua y Tlaxiaco se conocen manifestaciones de hidrocarburos superficiales en el subsuelo durante la perforación de pozos, corresponden a cantidades comerciales, por lo que se considera como aros potenciales. Las evidencias preliminares apuntan hacia las rocas generadoras como un factor crítico para la presencia de algún yacimiento, siendo el Jurásico Superior el más favorable, pero en Tlaxiaco se mantiene en condiciones de madurez. El Aptiano Superior (Formación la Peña) en la Cuenca de Chihuahua, es otra unidad que por su madurez y contenido orgánico, en ciertas áreas, se ha catalogado como generadora, por lo que la exploración a últimas fechas se ha enfocado con este objetivo.

### **7.8 Conclusiones.**

Las rocas generadoras más importantes y más ampliamente distribuidas de México corresponden a calizas arcillosas y lutitas calcáreas marinas de ambientes restringidos del Jurásico Superior, propiciados por la apertura del Golfo de México.

Aparentemente la mayoría de los yacimientos de petróleo del Mesozoico están relacionados genéticamente con las rocas del Jurásico Superior, especialmente del Tithoniano.

Algunos yacimientos del Terciario provienen también de rocas generadoras del Jurásico Superior, aunque se considera que algunos de ellos pudieran provenir de las mismas lutitas encajonantes.

**CAPITULO VIII CONCLUSIONES.**

1. La teoría aceptada sobre el origen del petróleo es que éste fue formado a partir de materia orgánica vegetal y animal que en grandes cantidades fue depositada hace millones de años en secuencias sedimentarias de grano fino.
2. Los compuestos que forma el petróleo son moléculas basadas principalmente en los elementos carbono e hidrógeno, que reciben el nombre de hidrocarburos.
3. El carbono se encuentra distribuido en la atmósfera, hidrósfera, litósfera y biosfera terrestre, es producido por organismos sencillos y complejos, por procesos de combustión y descomposición, cambios climáticos y fenómenos geológicos. También se encuentra formando parte de algunos minerales.
4. La materia orgánica está compuesta por moléculas orgánicas (carbón, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno) en forma monomérica o polimérica derivadas directa e indirectamente de la parte blanda de los organismos, las partes esqueléticas no se incluyen.
5. La materia orgánica es importante en la generación de hidrocarburos, ya que es la fuente principal de materia prima para la generación del aceite y gas, por lo que es necesario conocer su composición, características, evolución y su interacción con los factores geológicos los cuales se han estudiado y analizado en este trabajo.
6. Es importante comprender que a lo largo de la historia de la tierra las condiciones para la síntesis, depositación y preservación de la materia orgánica ha cambiado.
7. El surgimiento de la fotosíntesis como un fenómeno mundial constituye un evento histórico notable con respecto a la formación de rocas generadoras potenciales.
8. La producción en masa de la materia orgánica se presentó con la aparición de la fotosíntesis en el Precámbrico (hace dos mil millones de años).
9. La clorofila es el pigmento verde común a todas las células fotosintética,

absorbe todas las longitudes de onda del espectro visible, excepto las de la percepción global del verde, detectado por nuestros ojos.

10. El pigmento verde absorbedor de la luz en las plantas es el requisito fundamental para la fotosíntesis. En relación con el fitoplancton y las bacterias, las plantas superiores son el tercer contribuyente en importancia en cuanto a materia orgánica en sedimentos.
11. Durante el Silúrico aparecen de forma abundante plantas superiores en los sedimentos; mientras que desde el Devónico construyen secuencias con mayor contenido de materia orgánica.
12. Los organismos están constituidos en lo que se refiere a sus partes blandas por los siguientes constituyentes químicos: proteínas, lípidos, carbohidratos y ligninas en plantas superiores.
13. La roca generadora es aquella secuencia sedimentaria que es potencialmente generadora de petróleo o gas, en esta roca se lleva a cabo la migración primaria.
14. Las rocas generadoras de hidrocarburos son principalmente: Lutitas, lutitas calcáreas, margas, y calizas arcillosas con porcentajes mayores al 1% de materia orgánica.
15. Las localizaciones donde se genera el petróleo son aquellas que corresponden a una abundante masa de agua y abundantes aportes orgánicos en un ambiente reductor.
16. Las zonas en donde se localizan las rocas generadoras son: lagos, deltas, cuencas marinas semicerradas, cuencas marinas abiertas, plataformas y cuencas profundas.
17. Existen factores importantes que influyen en la formación de la roca generadora, estos factores se asocian con secuencias sedimentarias, estos factores son: el clima, ambiente tectónico, subsidencia, aporte de detríticos, velocidad de enterramiento, ambiente físico-químico, acidez, y potencial óxido – reducción.
18. La determinación de una roca generadora está basada en su contenido y tipo de materia orgánica. El análisis óptico permite definir cualitativa y

cuantitativamente cuatro tipos de materia orgánica: a) algáceo, b) herbáceo, c) leñoso, d) carbonoso.

19. La predominancia de la materia orgánica de los tipos algáceos y/o herbáceos, permite considerar que la roca generadora producirá hidrocarburos líquidos.
20. Los tipos de roca generadora de tipo leñosos y carbonosos darán lugar a hidrocarburos gaseosos.
21. Si la roca generadora contiene materia orgánica mixta podemos considerar a la roca como generadora de petróleo y gas.
22. Las tres etapas principales de la evolución de la materia orgánica en los sedimentos son la Diagénesis, Catagénesis y Metagénesis.
23. La Diagénesis se inicia en los sedimentos recientemente depositados, donde la actividad microbiana es uno de los principales agentes de transformación. Se presentan arreglos químicos a poca profundidad y baja temperatura, de 0° a 50°C y 0 a 300 bares de presión respectivamente. Al final de la diagénesis, la materia orgánica consiste principalmente de kerógeno.
24. La Catagénesis es el resultado del aumento de la temperatura durante el entierro en las cuencas sedimentarias. La degradación térmica del kerógeno es responsables de la generación de la mayor parte de los hidrocarburos, es decir del petróleo y gas, la temperatura es de 50 ° a 150°C y la presión puede ser de 300 a 1000 o 1500 bares. La Reflectancia de la vitrinita está entre 0.5 y 2.0
25. La Metagénesis se alcanza solamente a gran profundidad. Sin embargo, esta última etapa de evolución de la materia orgánica se inicia antes (reflectancia vitrinita cercana a 2%) que el metamorfismo de la fase mineral, (reflectancia vitrinita de 4%, correspondiente al principio de las facies de esquisto verdes).
26. El Kerógeno es la materia orgánica que es insoluble en solventes acuosos y orgánicos, se compone de carbono, hidrógeno y oxígeno.
27. Existen diferentes tipos de Erógenos, de acuerdo con su relación de H/C,

- Kerógenos tipo I,II y III siendo el Kerógeno tipo II considerado como el mejor para la generación de hidrocarburos.
28. Los hidrocarburos se clasifican de acuerdo a su arreglo estructural; en dos grandes grupos: 1) hidrocarburos saturados y 2) hidrocarburos insaturados.
  29. Dentro del grupo de hidrocarburos saturados se encuentran los alcanos; parafinas e iso-alcanos, naftenos; y Cicloalcanos.
  30. Dentro del grupo de hidrocarburos insaturados se encuentran los alquenos, alquinos, cicloalquenos, cicloalquinos y aromáticos (bencenos).
  31. Los estudios geoquímicas indican que el petróleo que se produce en México ha sido generado, principalmente, por lutitas calcáreas y calizas arcillosas del Jurásico Superior, y en menor proporción por las rocas generadoras del Terciario y Cretácico.
  32. Las Cuencas Mesozoicas y Cenozoicas del Sureste son las más importantes por su producción y reservas, el petróleo fue generado por calizas arcillosas del Tithoniano, mientras que en Tampico Misantla, segunda en importancia, el petróleo del Mesozoico proviene de las formaciones Tamán y Pimienta del Kimmeridgiano y Tithoniano respectivamente, en ambos casos el kerógeno es predominantemente del tipo II.
  33. Este trabajo ha sido diseñado para contar con material didáctico actualizado, en el tema de generación de hidrocarburos. Como apoyo didáctico de la asignatura Geología del Petróleo y asignaturas afines. Ya que con la elaboración de estos apuntes se cuenta con la información básica en relación a la generación de hidrocarburos.
  34. Los hidrocarburos son los energéticos más importantes, un recurso natural no renovable que aporta el mayor porcentaje del total de la energía que se consume en el mundo.

## GENERACIÓN DE HIDROCARBUROS

- **BIBLIOGRAFÍA.**

- Berkowitz Norbert., 1997. "Fossil Hydrocarbons. Chemistry and Technology. Academic Press", United States of America.
- Bjorlykke Knut., 1994. "Sedimentology and Petroleum Geology". Springer Verlag Berlin Heidelberg. Germany.
- Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, A.C., 2001. "Subsistemas Generadores de México". Volumen XLIX, Nums. 1-2, enero-diciembre, México.
- Briggs, D & Crowther P.R., 2001. "Palobiology II" Blackwell Science. Unnited Kindom, 583 p.
- Carbonell, L.M., 1982. "Obtención de Hidrocarburos", Facultad de Química, UNAM, México.
- Fieser L., 1984. "Química Orgánica fundamental", Ed Reverté, 2ª ed, Barcelona.
- Henriet J.P., and Mienert J., 1998. "Gas Hydrates: Relevance to world margin stability and climatic change". The Geological Society, Special publication No.137, United States of America.
- Hunt, M. John., 1996. "Petroleum Geochemistry and Geology". W. H. Freeman an Company, Second Edition, New York.
- Jahn, f., Cook Mark and Graham Mark., 1998. "Hydrocarbon Exploration and Production". Elsevier, United States of America.
- Jenkins. D.G., 1993. "Applied Micropalaentology". Krower, Academia Publishers. The Netherlands, 269 p.
- Kennet K. Landes 1972., "Geología del Petróleo". Ed Omega, 2ª ed, Barcelona.
- Levorsen A.I., 1967. "Geology of Petroleum", 2ª ed, W. H. Freeman and Company EE.UU.
- Link k. Peter., 2001. "Basic Petroleum Geology". Society of Petroleum Engineers, OGCI United States of America.
- Miall Andrew D., 1990. Principples of Sedimentary Basin Analysis. Springer,

## GENERACIÓN DE HIDROCARBUROS

Second Edition, New York.

- Pemex, Exploración y Producción. "Las Reservas de hidrocarburos de México", Vol. I y Vol II. Pemex, México, D.F.
- Protero, D.R., 1998. "Bringing fossils to life: An Intyroduction to Paleobiology". McGraw-Hill, California.
- Schumacher Dietmar and Abrams A. Michael., 1996. "Hidrocarbon Migration and its Near-Surface Expression". Memoir 67, American Association of Petroleum Gologists (AAPG).
- Surdam C.R., 1997. "Seal Traps, and the Petroleum System". Memoir 67, American Association of Petroleum Geologists (AAPG).
- Rodríguez Santana E., 1985. "Geología del Petróleo", 1ª ed. Facultad de Ingeniería U.N.A.M., México.
- Tarbuk, E., Lugtens, F.K., 1999. Ciencias de la Tierra "Una introducción a la Geología Física" 6ªed, Prentice Hall, Madrid.
- Tissot P.B., Welte D.H., 1978. "El Petróleo su origen y formación". 1ª ed. Conacyt, México.
- Wicander, R., Monroe, S.J., 1999. "Fundamentos de Geología" 2ªed. Internacional Thomson Editores, México.
- Villed., 1984 "Biología", 6ª ed. Interamericana, México
- Zamarripa M.G., 2001. "Recursos y Necesidades de México". Facultad de Ingeniería, UNAM.