



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

"APLICACIONES DE TERMODINAMICA DE PROCESOS  
IRREVERSIBLES A ECOSISTEMAS, AGROECOSISTEMAS Y  
ESTRUCTURAS BIOLÓGICAS DISIPATIVAS."

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**F I S I C O**

**P R E S E N T A :**

**CHRISTIAN AGUSTIN VAZQUEZ VILLANUEVA**



FACULTAD DE CIENCIAS  
UNAM

DIRECTOR DE TESIS: DR. JORGE ANTONIO MONTEMAYOR ALDRETE

2004



FACULTAD DE CIENCIAS  
SECCION ESCOLAR



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA 11  
MÉXICO

**ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ**  
**Jefe de la División de Estudios Profesionales de la**  
**Facultad de Ciencias**  
**Presente**

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:  
"Aplicaciones de Termodinámica de Procesos Irreversibles a Ecosistemas,  
Agroecosistemas y Estructuras Biológicas Disipativas"

realizado por Christian Agustín Vázquez Villanueva

con número de cuenta 09100265-3 , quien cubrió los créditos de la carrera de: Física

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis  
Propietario

Dr. Jorge Antonio Montemayor Aldrete

Propietario

Dr. Marco Antonio Martínez Negrete

Propietario

M. en C. Narciso José Ruiz Cárdenas

Suplente

Dr. Karo Michaelian Paw

Suplente

Dra. Cristina Piña Barba

Consejo Departamental de



*Alicia Zarzosa Pérez*

M. en C. Alicia Zarzosa Pérez  
Coordinadora de Licenciatura  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

## DEDICATORIA

A mis padres: Margarita Villanueva Carmona, Agustín Vázquez Hinojosa

Por todo el amor incondicional que siempre me han dado, gracias por hacer todo lo que se necesitó para que llegara a este punto de mi vida, por impulsarme a ser mejor.

A mis hermanos: Fermi, Citlali Sarahi, Rafael Machiliztli, y Marcelino Yoliliztli

A Patricia; porque siempre serás muy importante para mí, y sin ti no hubiera logrado ser tan feliz, por estar conmigo sin importar lo que suceda, por tu constante motivación, por todo lo que hemos pasado juntos y por lo que pueda venir.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México, con la que siempre quedare en deuda....Gracias.

Al Dr. Marcelo del Catillo Mussot, por todo su apoyo brindado durante la realización de esta tesis.

A mis sinodales: Dr. Marco Antonio Martínez Negrete, M. C. Narciso José Ruiz Cárdenas, Dr. Karo Michaelian Pauw y a la Dr. Cristina Peña Barba, por su cuidadosa y atinada labor de revisión del material de la tesis, la cual condujo a mejorar la forma y el contenido de la misma de manera sustancial.

De forma especial, a mi director de tesis el Dr. Jorge Antonio Montemayor Aldrete, por toda la atención y apoyo brindado para realizar esta tesis, por sus continuas enseñanzas y motivaciones, por ser tan atento y preocuparse por una formación integral de sus alumnos, por el placer de trabajar con alguien que no cree en metas imposibles.

De forma conjunta, al Dr. Jorge A. Montemayor Aldrete, al Ing. Pablo Ugalde Velez, al M. I. Andrés Montemayor, al Dr. Marcelo del Castillo Mussot, al Dr. Gerardo Vázquez y al Fís. Alejandro Mendoza, quienes colaboraron en el desarrollo de esta tesis.

# Índice general

<b>1. introducción</b>	<b>10</b>
1.1. Historia de la agricultura	10
1.1.1. Revolución agrícola	10
1.1.2. Época antigua	11
1.1.3. Época Moderna	11
1.1.4. Época contemporánea	12
1.2. Estado actual de la agricultura	12
1.3. ¿Por que un modelo?	15
1.4. Objetivos	17
1.5. Organización de la tesis	18
<b>2. Marco Teórico(Termodinámica de Procesos Irreversibles)</b>	<b>22</b>
2.1. Aspectos Generales	22
2.2. Conservación de masa	22
2.2.1. Conservación de masa en sistemas cerrados	22
2.2.2. Conservación de masa en sistemas abiertos	23
2.3. Conservación de Energía (Primera ley de la termodinámica)	23
2.3.1. Conservación de energía para sistemas cerrados	23
2.3.2. Conservación de energía para sistemas abiertos	24
2.4. Producción de Entropía (Segunda ley de la termodinámica)	25
2.4.1. Generación de entropía para un sistema cerrado de una componente	25

2.4.2.	Generación de entropía en sistemas abiertos, sin reacciones químicas entre sus componentes . . . . .	25
2.4.3.	Potencial químico . . . . .	26
2.4.4.	Generación de entropía en sistemas cerrados, con reacciones químicas entre sus componentes: . . . . .	26
2.4.5.	Generación de entropía para sistemas abiertos con reacciones químicas en su interior . . . . .	28
2.4.6.	Consideraciones generales sobre la producción de entropía y los procesos irreversibles. . . . .	29
2.4.7.	Propiedades Generales de la producción de entropía son: . . . . .	29
2.4.8.	Entropía probabilidad y información . . . . .	30
2.4.9.	Estados estacionarios . . . . .	31
2.4.10.	Flujo de entropía en los estados estacionarios . . . . .	31
2.4.11.	Estabilidad de estados estacionarios cerca del equilibrio . . . . .	32
2.4.12.	Acoplamiento de los estados estacionarios . . . . .	33
2.5.	Termodinámica de los procesos irreversibles no lineales . . . . .	33
2.5.1.	Estabilidad de estados estacionarios de procesos irreversible no lineales . . . . .	34
2.6.	Orden y disipación . . . . .	35
2.7.	Termodinámica de la Evolución . . . . .	36
<b>3.</b>	<b>Resumen de fisiología vegetal</b>	<b>39</b>
3.1.	Fisiología de una célula vegetal . . . . .	39
3.2.	Partes de una planta . . . . .	39
3.2.1.	Anatomía de las hojas . . . . .	40
3.2.2.	El tallo y el sistema vascular . . . . .	40
3.2.3.	La Raíz . . . . .	40
3.3.	Mecanismos de alimentación de agua y nutrientes en la planta . . . . .	41
3.3.1.	Potencial del agua . . . . .	41
3.3.2.	Disponibilidad de agua y nutrientes en la superficie de raíz . . . . .	43
3.3.3.	Absorción de agua y nutrientes en la raíz . . . . .	44
3.3.4.	Transporte de agua y nutrientes a través del xilema . . . . .	46

3.3.5.	Evaporación y transpiración . . . . .	47
3.3.6.	Fotosíntesis . . . . .	48
3.3.7.	Flujo de radiación necesaria para la fotosíntesis . . . . .	49
3.3.8.	Flujo de CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> . . . . .	50
3.4.	Etapas de crecimiento de un sistema biológico . . . . .	50
3.4.1.	Etapa Embrionaria . . . . .	50
3.4.2.	Etapa Juvenil . . . . .	51
3.4.3.	Etapa Adulta . . . . .	51
<b>4.</b>	<b>Ecosistemas</b>	<b>54</b>
4.1.	Introducción . . . . .	54
4.2.	Ecosistemas . . . . .	54
4.2.1.	Definición . . . . .	54
4.2.2.	Niveles de organización de un ecosistema . . . . .	54
4.2.3.	Propiedades estructurales de un ecosistema . . . . .	55
4.2.4.	Dinámica de un ecosistema natural . . . . .	56
4.2.5.	Flujo de Energía: . . . . .	56
4.2.6.	Ciclo de Nutrientes: . . . . .	56
4.2.7.	Regulación de poblaciones: . . . . .	58
4.2.8.	Desarrollo y evolución de un ecosistema . . . . .	58
4.3.	Agroecosistemas . . . . .	60
4.3.1.	Definición . . . . .	60
4.3.2.	Organización . . . . .	60
4.3.3.	Flujos de energía . . . . .	60
4.3.4.	Ciclo de nutrientes . . . . .	61
4.3.5.	Mecanismos de Regulación de Población . . . . .	61
4.3.6.	Estabilidad . . . . .	61
4.3.7.	Fronteras . . . . .	61
4.3.8.	Sustentabilidad de un agroecosistema. . . . .	62
4.4.	Energéticos, Biosfera y Tecnosfera . . . . .	62
4.4.1.	Balance dinámico Humanidad-Naturaleza . . . . .	63

<b>5. Revisión de la literatura sobre modelos y análisis energéticos de ecosistemas, agroecosistemas, y estructuras biológicas disipativas.</b>	<b>66</b>
5.1. Introducción . . . . .	66
5.2. Modelos y análisis de ecosistemas . . . . .	66
5.3. Modelos y análisis energéticos de agroecosistemas . . . . .	74
5.4. Biología del desarrollo . . . . .	75
<b>6. Modelo de Sverizhev (un modelo basado en Termodinámica de Procesos Irreversibles)</b>	<b>83</b>
6.1. Introducción . . . . .	83
6.2. Sustentabilidad de la biosfera . . . . .	83
6.3. Modelo termodinámico de un ecosistema . . . . .	84
6.3.1. Sobreproducción de entropía en un agroecosistema . . . . .	86
6.3.2. Producción de entropía de la vegetación . . . . .	87
6.3.3. Sobreproducción de entropía en un sistema agrícola . . . . .	88
6.4. Conclusiones . . . . .	90
6.4.1. Ventajas: . . . . .	90
6.4.2. Desventajas: . . . . .	90
6.4.3. Camino a seguir: . . . . .	91
<b>7. Nuestra contribución teórica</b>	<b>93</b>
7.1. Tiempo de vida o vida útil de una estructura disipativa (Termodinámica del envejecimiento) . . . . .	93
7.2. Daño funcional y el funcionamiento remanente porcentual. . . . .	101
7.3. Incremento de la Tasa Metabólica Especifica o función disipación de Rayleigh, respecto al mínimo, $\phi_{R\text{mín}}$ , y la duración de la vida. . . . .	104
7.4. Envejecimiento de una célula . . . . .	105
7.5. División de la Tasa Metabólica total de un ser vivo. . . . .	107
7.6. Etapas del desarrollo biológico de un ser vivo (una descripción termodinámica). . . . .	108
7.6.1. La ecuación de crecimiento logístico de un organismo y la rapidez de generación de entropía. . . . .	108

7.7. Efecto de la radiación $\gamma$ de Cobalto 60 sobre semillas en la germinación y crecimiento posterior. . . . .	113
7.8. Tiempo de vida hojas de plantas. . . . .	114
7.9. Modelo fenomenológico de un ecosistema . . . . .	117
7.9.1. Metabolismo específico promedio de un ecosistema . . . . .	117
7.9.2. Modelo mecánico de un ecosistema . . . . .	121
7.10. Modelo termodinámico de un ecosistema . . . . .	124
7.10.1. Área de estudio de un ecosistema . . . . .	125
7.10.2. Flujo de radiación solar . . . . .	126
7.10.3. Modelo basado en balances de materia y producción de entropía . . . . .	128
7.10.4. Subsistema plantas: . . . . .	129
7.10.5. Subsistema hongos . . . . .	133
7.10.6. Subsistema animales . . . . .	134
7.10.7. Subsistema descompositores de detritus . . . . .	135
7.10.8. Subsistema bacterias fijadoras de nitrógeno . . . . .	136
7.10.9. Subsistema Suelo . . . . .	137
7.10.10. Flujos de entropía en un ecosistema . . . . .	138
7.10.11. Análisis comparativo entre un Agroecosistema y Agrosistema . . . . .	140
7.10.12. Agroecosistema . . . . .	141
7.10.13. Flujos de entropía en un agroecosistema . . . . .	142
7.10.14. Flujos de entropía del agrosistema . . . . .	143
7.11. Respuesta de un cultivo a perturbaciones . . . . .	143
7.11.1. Caso 1: respuesta al dejar de aplicar fertilizante. . . . .	143
7.11.2. Caso 2: respuesta al dejar de aplicar fertilizantes y dehierbar . . . . .	144
7.11.3. Análisis cualitativo del caso 1 . . . . .	145

## 8. Conclusiones

150

# Índice de figuras

1-1. Suelo cultivable y aplicación de fertilizantes en el Mundo y México [21] . . . . .	16
1-2. Suelo irrigado y Tractores en el Mundo y México [21]. . . . .	16
2-1. Retroalimentación Evolutiva . . . . .	37
3-1. Flujo de agua, nutrientes y savia en una planta . . . . .	49
3-2. Etapas de Crecimiento (reproducida de [8]) . . . . .	51
3-3. Curvas de crecimiento de una planta (Tomadas de [9]) . . . . .	52
4-1. Sucesión primaria . . . . .	59
4-2. Demanda de energía en forma de alimento por parte de la humanidad a través de su historia. . . . .	64
7-1. Estructuras disipativas que envejecen . . . . .	94
7-2. Diferencia entre un estado en equilibrio y fuera de equilibrio termodinámico . . .	96
7-3. Curvas experimentales metabólicas de un ratón ( Tomada de [5]) . . . . .	97
7-4. Velocidad metabólica basal normal a diferentes edades para cada sexo. (Tomada de [6]) . . . . .	98
7-5. Función disipación de Rayleigh durante la evolución ontológica de una estructura disipativa . . . . .	98
7-6. Limite máximo a la generación de entropía, $K_S$ de una estructura disipativa. . .	100
7-7. Entropía Configuracional . . . . .	100
7-8. Tiempo de vida máxima de varios mamíferos en función de su Tasa Metabólica Específica o función disipación de Rayleigh (Tomada de [1]) . . . . .	102

7-9. Funcionamiento fisiológico remanente porcentual para distintos órganos de un humano. (Tomada de [1]) . . . . .	103
7-10. Modelo sencillo de una célula . . . . .	106
7-11. Curvas de crecimiento de una planta . . . . .	109
7-12. Curvas de desarrollo biológico ( Línea continua-simulaciones, Línea a tramos-caso real ) . . . . .	111
7-13. Efecto de radiación en semillas . . . . .	114
7-14. Experimentos de efectos de radiación semillas de condolí . . . . .	115
7-15. Periodo de vida de hojas en tasa metabólica específica (Fotosíntesis Neta). (Tomada de [8]) . . . . .	116
7-16. Tasa Metabólica específica promedio de un ecosistema a través de su evolución . 120	
7-17. Área del ecosistema, máxima, fotosintética, y potencial de crecimiento para cada planta . . . . .	126
7-18. Radiación de onda corta que llega a la cubierta vegetal . . . . .	127
7-19. Radiación de onda corta . . . . .	127
7-20. Flujo de materia y energía en una planta . . . . .	129
7-21. Flujos de materia en un hongo . . . . .	134
7-22. Flujos de materia en un animal . . . . .	135
7-23. Flujos de materia en un descompositor . . . . .	136
7-24. Flujo de nutrientes en el suelo . . . . .	137
7-25. Flujo de agua en el suelo . . . . .	138
7-26. Respuesta al dejar de aplicar fertilizantes . . . . .	144
7-27. Respuesta al dejar de aplicar fertilizantes y dejar de deshierbar . . . . .	145

# Prefacio

Dada la cantidad finita de: fuentes de energéticos de origen fósil y recursos naturales en la tierra, es necesario realizar dos tareas fundamentales para garantizar el desarrollo y sustento de las futuras generaciones. La primera tarea es desarrollar fuentes de energía alternativa y la segunda tarea es optimizar los procesos en los que esta involucrada la actividad humana. Es decir hacer los procesos menos despilfarradores de energía. Motivados por esto surgió la idea de hacer un análisis energético de un sistema agrícola utilizando Termodinámica de Procesos Irreversibles. Se Observa que la agricultura se encuentra ante dos constricciones para su desarrollo futuro: 1) Los energéticos, 2) Las limitaciones en los recursos naturales de la que depende (suelo, agua). Ya que estos se están utilizando de manera no estacionaria.

No obstante en el camino hacia este objetivo encontramos que la Termodinámica de Procesos Irreversibles es una herramienta poderosa que nos podía servir para explicar de manera teórica y formal algunos de fenómenos observados en ecosistemas, agroecosistemas y en particular en las estructuras biológicas. Por lo que finalmente el título de este trabajo es el nuevo.

Po lo tanto los objetivos generales de esta tesis son:

1. Mostrar que es importante hacer un análisis energético de un agroecosistema de un punto de vista teórico basado en leyes físicas, para evaluar su sustentabilidad, hacer un revision de los modelos y analizar a los, ecosistemas, agroecosistemas y estructuras biológicas en un marco teórico de Termodinámica de Procesos Irreversibles.
2. Desarrollar un modelo fenomenológico global del metabolismo de un Ecosistema.
3. Desarrollar análisis sobre el tiempo de vida o vida útil de una Estructura Disipativa.
4. Desarrollar un modelo mecanístico de un ecosistema, basado en balances de energía, materia y producción de entropía.

Para lograr los objetivos, la tesis se ha dividido en tres secciones:

- Capítulo 1 al 6- Se da una panorámica del problema actual de la agricultura y la necesidad de entender la dinámica de los ecosistemas en interacción con el hombre, el marco teórico y conceptual para abordar el problema, una revisión de la literatura existente, y un marco teórico particular del problema

- **Capítulo 7-**En este capítulo se aborda el problema de tiempo de vida útil de estructuras disipativas en función de su **Tasa Metabólica Específica** o **función disipación de Rayleigh**, en particular para mamíferos; se introduce la función daño acumulativo y el porcentaje residual función fisiológica para distintos órganos de un humano; se analiza como el incremento de la Tasa Metabólica Específica o función disipación de Rayleigh, respecto a su valor mínimo afecta en la duración de la vida de un organismo vivo; se explica el envejecimiento de una célula; se realiza un análisis de ritmo metabólico total de ser humano; se describen las etapas del desarrollo biológico de un organismo vivo desde una perspectiva termodinámica; se analiza el efecto de radiación gama sobre semillas de ajonjolí y su crecimiento posterior; el tiempo de vida de hojas de árboles. En las últimas secciones de este capítulo se muestra un modelo fenomenológico y mecanístico de un Ecosistema y Agroecosistema, primero a nivel abstracto y después a nivel de detalle. También se realiza un análisis comparativo entre un Agroecosistema y un Agrosistema. Y por último se desarrolla un análisis de la respuesta de un cultivo de ante perturbaciones externas como dejarle de aplicar una fuente importante para su desarrollo.
- **Capítulos 8-** Se muestran las conclusiones de los resultados obtenidos en el capítulo 7

# Capítulo 1

## introducción

### 1.1. Historia de la agricultura

#### 1.1.1. Revolución agrícola

Hace 500,000 años la alimentación del hombre estaba basada en la recolección de plantas silvestres y la cacería de animales salvajes, los cuales les aportaba entre 2000-2500 kcal per cápita diarias. Es decir tenían un comportamiento cercano a los animales en cuanto su interacción con el medio ambiente, ya que apenas tenían la energía necesaria para su supervivencia[1]. La humanidad aprendió a manejar el fuego hace 60,000 años, con ello aumentó el aprovechamiento energético de los alimentos, así como el número de alimentos asimilados pero el cambio fue poco significativo en su forma de obtener sus alimentos. En aquella época las poblaciones eran pequeñas y se asentaban temporalmente en lugares con abundantes recursos, por lo que les era fácil trasladarse a otros lugares cuando estos escaseaban. Bajo este esquema de alimentación la población humana hace 10,000 años en el Neolítico llegó a un máximo de 5.3 millones de humanos [2]. Inicio de sociedades estables, permanentes. Entonces surge la agricultura como una necesidad de satisfacer la alimentación de una población creciente, así el hombre se hace progresivamente sedentario, y domestica tanto algunas plantas como algunos animales silvestres. Según, Childe citado por [4], la agricultura también fue la respuesta a la presión en periodo adverso de clima. Durante los 7000 años posteriores al invento de la agricultura el hombre de Euroasia utilizó como única fuerza de trabajo, la potencia humana es decir 70 Watts-h ( $\sim 57$  kcal) [5]. Y fue hace 3000 años cuando pastores nómadas errando las estepas de Euroasia domesticaron el caballo y las reses, así el caballo y el buey fueron utilizados para arar la tierra con una potencia efectiva de 248 Watts-h (1/3 de la energía máxima que pueden proporcionar ya que el collar de tiro, no era el más óptimo) [6]. Además con la cría de ganado se fueron aprovechados más recursos naturales como el pasto no asimilable por el hombre, en forma de todos los derivados del ganado (cuero, leche, carne), así también se inició el pastoreo. El patrón en el Neolítico fueron granjas que cultivaban plantas y criaban ganado. Su únicas herramientas eran a base de, hueso, madera y piedra[6].

### 1.1.2. Época antigua

Cuando el hombre se volvió sedentario surgieron grandes culturas que basaron su economía en la agricultura, mediante cultivo de cereales que se adaptaron más fácilmente a su medio geográfico [7]. Hacia el 2500 a.c, al final del neolítico se descubre el cobre y aparece la necesidad de registrar los excedentes de las cosechas y calcular los impuestos para lo cual paulatinamente surge la escritura y las matemáticas elementales. Se empezaron a desarrollar empíricamente técnicas para aprovechar mejor los recursos naturales, como la irrigación en Babilonia y Egipto, y se comenzó a desarrollar manuales sobre agricultura. Empezaron por utilizar mejor la potencia de los animales de tiro, el desarrollo de herramientas como el carro con dos ruedas tirado por animales en Egipto, el arado rudimentario primero de madera y luego de puntas de cobre, que les permitió tener un mayor productividad con menor esfuerzo. Generalmente, las ciudades eran fundadas cerca de lugares con recursos naturales abundantes. Sobre todo cerca de ríos ya que aprovechaban el agua de estos para el riego de los cultivos, además de que también aprovechaban la corriente de éstos para el transporte de los alimentos. No obstante, hay evidencia de que ciudades antiguas fueron abandonadas por falta de planificación en cuanto a disposición de recursos naturales[8].

La agricultura que practicaron los Aztecas en México y los Incas en Perú fue sedentaria, y desarrollan una de temporal, aprovechando las vegas de los ríos, las inundaciones que depositaban fertilizantes en las tierras de cultivo; más tarde iniciaron el cultivo en terrazas (para aprovechar más eficientemente el agua de la lluvia, evitar la erosión del suelo y aprovechar las zonas montañosas para la siembra) e iniciaron el empleo planificado del desmonte, el cultivo en chinampas y el regadío, y se utilizó pescado como fertilizante para el maíz. Su agricultura y tamaño de las poblaciones estuvo limitada por la carencia de animales tiro[7].

Conforme la población de las ciudades fue creciendo, el traslado a nuevas tierras de cultivo, fue más difícil; entonces para mantener la productividad de los cultivos, en varias partes de la tierra, se implemento el método de rotación de tierra, en el cual se dejaba descansar la tierra [7].

En Europa durante la edad Media, la rotación de cultivos de acuerdo a las estaciones del año fue introducida por los anglosajones, en las regiones habitadas por ellos, donde había grandes campos abiertos de cultivos, se practicaba la fertilización con estiércol y los cultivos eran diversos (el cultivo de avena fue de los más estables); se llevaba un control sobre datos de cultivos[4]. En esa época perfeccionaron el arado como hoy se conoce, y se mejoro el collar de tiro para los bueyes, utilizando mejor la energía animal [7]. El decaimiento de este sistema de economía agrícola se debio parcialmente a la presión demográfica, a presiones socioeconómicas (economía monetaria, cambios sociales) y la invasión de un plaga conocida como "muerte negra" en 1348 introducida en Inglaterra. Después de esta crisis, los campos feudales se convirtieron en estados individuales [4].

### 1.1.3. Época Moderna

Con los avances científicos y tecnológicos del siglo XVIII y XIX, tales como el estudio y conocimiento de la química de suelos, el conocimiento de la importancia de las leguminosas co-

mo fijadoras de nitrógeno, el uso de: la composta, el silo, la pasteurización y la industrialización de productos agrícolas (cristalización de azúcar a partir de remolacha, la lana, el algodón, el henequén etc.), y la división del trabajo en la sociedad, la agricultura de subsistencia se desarrolló hacia una agricultura comercial, se mejoraron e innovaron nuevas técnicas para aumentar la producción incrementando la producción unitaria por cultivo y las tierras de cultivo. Este adelanto se manifestó en la tecnificación y conocimiento de: preparación del suelo para la siembra; manejo del suelo ( fertilización, rotaciones, densidad de siembra); control de plagas y enfermedades; combate de hierbas; practica de riego; adaptación de nuevos cultivos; mejores practicas de recolección de frutos y semillas; conservación de granos y otros productos alimenticios para el hombre y el ganado; industrialización de los productos agrícolas; mejoramiento de plantas y animales; intensificación en el reciclaje de los cultivos y el ganado, dando lugar a una agricultura tecnificada altamente productiva más cercana a la sustentabilidad [7]. Selección artificial de plantas y animales.

#### **1.1.4. Época contemporánea**

En el siglo XX la agricultura se encontró con dos límites: el primero apareció cuando se lleo a un límite en las tierras de cultivo disponibles, y el segundo ocurrió debido a la crisis de escasez de energéticos (crisis 1970's). El primero se superó momentaneamente haciendo más productiva las tierras disponibles mediante mayor uso de energía fósil y nuevas tecnologías, pero a costa de aumento del suministro de energía. De ahí que apartir de 1980's surjan los análisis eco-energéticos en sistemas agrícolas [9].

## **1.2. Estado actual de la agricultura**

Actualmente hay una gran brecha entre la agricultura de los países en desarrollo y los países desarrollados. La productividad de cada país depende de su desarrollo tecnológico-científico (presión socioeconómica) y su disponibilidad de recursos (agua, suelo, energía). La disponibilidad de agua, suelo, energía para la agricultura esta directamente vinculada al crecimiento de la población (presión demográfica). La presión demográfica reduce la disponibilidad de tierras para cultivos, por los que se tiene que incrementar la producción por unidad de hectárea (land productivity [kcal/ha/año]) lo cual se logra a costa de entradas químicas (fertilizantes, etc). La presión socioeconómica, es la reducción de horas trabajo del hombre en la agricultura, con la introducción de un tecnología (maquinaria, técnicas), se incrementa la productividad por hora de labor (labor productivity [kcal/hora/año] ). De cualquier manera para aumentar la producción se requiere gasto de energía ya sea directa (combustibles) o indirecta (fabricación de fertilizantes, maquinaria, herramientas, etc) [10-12].

La agricultura en los países desarrollados se basa principalmente en los subsidios del estado, para protección de la vulnerabilidad de los precios, además de garantizar buenos sueldos para trabajadores de granjas, elevan su productividad con mayores entradas artificiales tales como fertilizantes, y tecnologías que hacen que las horas-trabajo dedicadas al campo se reduzcan, sin disminuir la producción [4]. En los a países en desarrollo, los campesinos agricultores continúan

abandonando el suelo para moverse a áreas urbanas e industriales [13].

El problema de la alimentación en la tierra actualmente esta parcialmente resuelto ya que aunque la mayoría de los humanos tenemos los alimentos necesarios, existen lugares donde hay hambre y desnutrición (en países en desarrollo los humanos que sufren desnutrición son 828 millones de personas 1994-96[15]). Esto ocurre principalmente debido a tres factores: mala distribución de los alimentos; bajo poder adquisitivo en algunos países; y baja producción agrícola [3,16]. El éxito parcial para satisfacer la necesidad de alimentos esta basada en las innovaciones científicas y tecnológicas, lo cual incluye el desarrollo de nuevas plantas, el uso de fertilizantes, herbicidas, estructuras extensivas de irrigación, etc. No obstante estas innovaciones, sobreusan y degradan las fuentes naturales de las cuales depende la agricultura como son el suelo, las fuentes de agua, y la diversidad genética natural. Ellas también han creado una dependencia de combustibles fósiles no renovables. Esta forma de producción alimentaria no puede seguir por largo tiempo porque deteriora las condiciones que hacen posible la agricultura[13].

La agricultura convencional esta construida sobre dos objetivos: la maximización de producción y la maximización de beneficios. Las practicas básicas para lograr estos objetivos son: arado intensivo, monocultivos, irrigación, control químico de plagas, manipulación genética de plantas. Lo preocupante de estas practicas es que se han llevado a cabo sin pensar a largo plazo y sin considerar la dinámica ecológica de los agroecosistemas. La agricultura convencional recalca ganancias productivas a corto plazo [13].

**El cultivo (arado) intensivo** es utilizado para mejorar el drenaje, aeración, rápido crecimiento de las raíces, fácil sembrado de las semillas, control de yerbas y reintegración de desperdicios. Pero trae como consecuencia la compactación, perdida de fertilidad, y erosión (por destrucción mecánica de las partículas del suelo haciéndolas polvo, permitiendo que sean más fácilmente arrastradas por el viento y el agua) del suelo.

**El monocultivo** es un resultado natural de un acercamiento industrial a la agricultura, donde las entradas de labor son minimizadas y las entradas basadas en tecnología son maximizadas para incrementar la eficiencia productiva, lo cual da oportunidad de cultivar una planta en regiones extensas utilizando solamente una maquinaria específica. La desventaja del monocultivo es que aumenta el riesgo de perdida debido a una plaga ( la estabilidad del sistema se reduce).

**La irrigación**, es el suministro de agua a los campos de cultivo desde mantos acuíferos, depósitos y ríos. La producción de cultivos, usa cerca de dos terceras partes de toda el agua tomada de ríos, lagos y acuíferos para la actividad humana [14,17], más de la mitad del agua utilizada para este fin no es aprovechada por las plantas. Aunque solo el 16 % del suelo mundial agrícola es irrigado este produce 40-50 % del alimento mundial [17,18]. Para producir una tonelada de granos se requiere de 500-1000 m<sup>3</sup> de agua [14]. El problema es que el agua es bombeada de los mantos, acuíferos, y ríos más rápido de lo esta que renueva por las lluvias, (cada año hay un sobrebombeo de 160 billones de metros cúbicos [17]). Otra cosa que es irónica es que aunque se aumenta la producción de granos como el trigo, maíz y arroz, los precios han declinado bastante, lo cual no valora el costo del agua utilizada [17]. Por otro lado, la demanda de agua en la ciudades se satisface, tomando agua destinada a la agricultura [14]. En la figura 1-2 se muestra el aumento en el suelo irrigado en las recientes decadas tanto en el Mundo como en México; las graficas sugieren un tendencia al aumento del porcentaje irrigado. En la figura

1-2 también se muestra como se ha aumentado los tractores en la agricultura tanto en el Mundo como en México.

El agua al ser transferida de su curso natural hacia los campos y suelos incrementa la evaporación, estos cambios en los niveles de humedad afectan los patrones de lluvias y tiene impacto en la vida salvaje de los ecosistemas naturales. Además de que el suelo se erosiona (por arrastre de partículas) y salifica ( a una tasa de  $2 \times 10^6$  h/año, actualmente 20% del suelo irrigado) y contamina lagos y ríos por el arrastre de herbicidas y otros agroquímicos. Un estudio de la EPA (Environmental Protection Agency) en 1995 encontró que de 29 ciudades en el medio-oeste analizadas, 28 tenían herbicidas presentes en el agua de la llave. Existe también el problema preocupante del agua para el futuro. Según [14] para el 2025 la humanidad para todas sus actividades requerirá  $6515 \text{ km}^3$  al año de agua, y el agua actualmente accesible para actividades humanas es de  $6750 \text{ km}^3$  de agua. En un cultivo irrigado el 70% de la humedad en el suelo se debe a irrigación y 30% a la lluvia. Así la escasez de agua es realmente una restricción para la producción agrícola [14]. La práctica de la agricultura debería de ser orientada hacia la conservación del agua y no sólo a la maximización de la producción [13].

**El control químico de plagas y yerbas**, después de la Segunda Guerra Mundial, los pesticidas desarrollados como armas, dieron nacimiento a nueva ciencia que ofrecía a los granjeros una manera de liberarse de las plagas que amenazaban sus cultivos, para así aumentar sus cosechas. En el corto plazo los pesticidas resultaron ser eficientes, pero en el proceso se eliminaron a muchos de los predadores naturales de las plagas, aumentando así la población de plagas aun más que antes; forzando a utilizar más pesticidas lo cual desarrolló una gran resistencia a los mismos por parte de las plagas. Además del incremento en el gasto de los granjeros, los pesticidas tiene efectos negativos sobre el medio ambiente y la salud humana.

**La Manipulación de los genomas de las plantas** se ha realizado gracias al avance de la ingeniería genética de plantas, logrando la producción de semillas híbridas. Estas variedades de plantas híbridas son más productivas, más resistentes a estrés climático y a plagas, este es el principal beneficio que está detrás de la llamada "revolución verde", no obstante estas variedades requieren condiciones óptimas (fertilizantes inorgánicos y pesticidas) para realizar su potencial productivo. Además algunas de estas plantas se programan para que no pueden producir semillas que engendren plantas, lo que hace a los agricultores dependientes de productores comerciales de semillas (Transgénicas). El problema de incrementar la uniformidad genética de cultivos domesticados, es que los hace más vulnerables a ataques de plagas y patógenos que adquieran resistencia a pesticidas [13].

La razón de **erosión de suelo** excede la formación natural del suelo. Actualmente se pierden globalmente cada año 22-24 billones de toneladas de suelo[16]. En países industrializados las pérdidas son de 10-20 ton/h/año y más de 100 ton/h/año en ciertas regiones de India, América Central y África. Mientras en condiciones de temperatura trópica la razón de formación de suelo es de 0.3-2.0 ton/h/año (aún debatible). Actualmente se ha acrecentado con la deforestación, los cultivos en pendientes y el sobrepastoreo. Hay 2 billones de hectáreas de suelo de cultivo (17% del suelo vegetal ó 38% de los suelos agrícolas de la tierra, según la ONU 1991 ) que están degradados en algún nivel. Además de que la erosión del suelo en un 40% tiende a causar una declinación de la productividad de las cosechas, de cinco a siete veces [9]. Los fertilizantes pueden reemplazar los nutrientes temporalmente, pero no pueden reconstruir la fertilidad y

salud total del suelo; además que también tienen efectos negativos [13]. En la figura 1-1 se muestra como actualmente se está dando un decremento de las tierras de cultivo, tanto en el mundo como en México, en la misma figura se muestra como la cantidad de fertilizantes se ha incrementado en el pasado, y parece estar oscilando en alrededor de un estado estacionario.

De 1970 a 1990 la exportación de países desarrollados a países en desarrollo aumentó cinco veces, lo cual amenaza la seguridad alimentaria de los países menos desarrollados. Los países pobres consumen más productos agrícolas que los que ellos producen, y gastan arriba del 80 % de sus ingresos en alimento [19]. Aunque siempre ha existido la desigualdad entre países y grupos dentro de los países, la modernización de la agricultura a tendido a acentuarla, ya que usualmente sólo los grandes propietarios de las tierras de cultivo son los que tienen acceso a las nuevas tecnologías [13].

Las tecnologías tradicionales han tenido un impacto dañino no deseado para el medio ambiente, por pensar a corto plazo; pero actualmente hay tecnologías emergentes (predicciones meteorológicas, dosis adecuada de fertilización, retenedores de humedad, fijadores de nitrógeno, automatización, etc) que están orientadas a la reducción de entradas de energía y sustancias químicas. No obstante estas tecnologías no están disponibles para todos los granjeros [20]. Por otro lado, pocos estudios energéticos se han enfocado a la agricultura en países en desarrollo, donde la irrigación y fertilización se está expandiendo rápidamente [19].

El uso de recursos energéticos y químicos por una persona de un país desarrollado tiene en promedio siete veces más impacto negativo sobre el medio ambiente que una persona en un país en desarrollo. Así aunque los países industrializados son una quinta parte del mundo (1.2 billones) y su población crece lentamente ellos tienen el control y consumen dos quintos de la mayoría de los recursos, incluyendo alimentos y productos agrícolas [16].

Ante el problema de constricciones físicas (fuentes naturales y energéticas) que hacen posible la agricultura hay dos posiciones encontradas: Una que considera que realmente es preocupante la manera en la que se desarrolla actualmente la agricultura y otra ve con más optimismo la disponibilidad futura de recursos y confía en la habilidad de la humanidad para mejorar las tecnologías y los aspectos energéticos necesarios para vencer estas constricciones físicas [19].

### 1.3. ¿Por que un modelo?

Enfrentamos una gran cantidad de problemas a nivel agrícola, pero no hay marcha atrás, no podemos regresar a una población de 5.3 millones de habitantes, tenemos que entender la dinámica de los ecosistemas bajo la perturbación humana.

Por lo comentado anteriormente, es claro que todas las fuentes naturales que hacen posible la agricultura están utilizándose de una manera no estacionaria. Lo cual compromete la salud del medio ambiente y la alimentación para las futuras generaciones. Entonces, surge la pregunta ¿Cómo debe operar el sistema para que alcance un estado estacionario tomando como constricciones las fuentes disponibles, la población humana y la conservación del medio ambiente?. Para responder esto uno se ve motivado a estudiar la dinámica de un agroecosistema y su relación con el medio ambiente y la productividad de este, para así poder tomar decisiones que lleven a nuestro sistema a un estado estacionario (sustentable). Para lograr eso es necesario modelar y

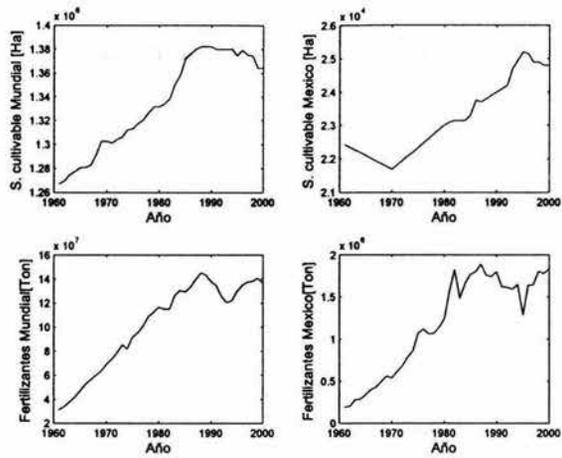


Figura 1-1: Suelo cultivable y aplicación de fertilizantes en el Mundo y México [21]

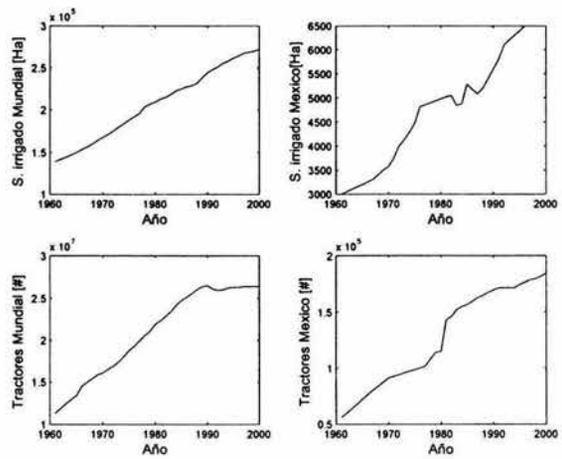


Figura 1-2: Suelo irrigado y Tractores en el Mundo y México [21].

analizar un agroecosistema, desde punto de vista teórico que se base en leyes físicas, biológicas y químicas, no solamente en teorías económicas, sociales que tienden a ser muy subjetivas.

De una revisión general del panorama temático desarrollado en el Capítulo 6, se puede ver que en particular en la producción agrícola y en ecosistemas alterados por la especie humana (agroecosistemas y agrosistemas) existen muchos problemas no resueltos satisfactoriamente tales como:

1. Pérdida continua de capa vegetal a nivel global.
2. Ignorancia de los tiempos de recuperación de un ecosistema vegetal alterado así como de los factores principales que intervienen en la afectación del suelo.
3. Falta de una teoría general multifactorial que explique a nivel básico los cultivos vegetales o ecosistemas vegetales simples; y su interacción con especies animales y hongos.
4. Falta de una teoría económica que explique a nivel energético (no sólo económico) la sustentabilidad de un ecosistema vegetal a largo plazo.
5. Falta de una teoría formal de termodinámica de procesos irreversibles que permita definiciones y subteorías, operativas acerca de lo que es un ecosistema vegetal, y lo que es el estado estacionario de dichos sistemas; que explique en que condiciones puede darse la estabilidad de dichos sistemas; que explique como debe entenderse el acoplamiento entre diversos sistemas disipativos vegetales; sus tiempos de relajación y / o recuperación de sistemas vegetales.
6. Falta de una teoría física que explique satisfactoriamente el tiempo de vida de una estructura disipativa.
7. Falta de una teoría basada en leyes físicas que explique satisfactoriamente la etapas de desarrollo de un sistema biológico.

## 1.4. Objetivos

Los objetivos de esta tesis son:

- Revisar la literatura existente acerca de modelos, y analizar de un ecosistemas, agroecosistemas, y estructuras biológicas, vista desde una aproximación termodinámica.
- Exponer de manera completa la teoría más general (conocida) sobre ecosistemas y agroecosistemas desde un marco de termodinámica de procesos irreversibles.
- Analizar la evolución ontológica de un ecosistema desde un perspectiva global fenomenológica, irreversible y después desarrollar un modelo mecanicista de un ecosistema y un agroecosistema mediante la utilización de la termodinámica de procesos irreversibles.

- Desarrollar un teoría termodinámica sobre el tiempo de vida ó vida útil de las estructuras disipativas; la cual además nos permita explicar las distintas etapas del desarrollo un sistema biológico (embrionaria, juventud, madurez) y en particular explicar el envejecimiento celular, dentro de sistemas multicelulares.
- Hacer una análisis comparativo entre un agroecosistema y un agrosistema.
- Analizar y modelar la respuesta de un cultivo a distintas perturbaciones externas, para calcular tiempos de relajación de cultivos perturbados. Destacando algunas aplicaciones simples, enfocadas al estudio de sistemas muy alterados por la acción humana, en la intención de averiguar los parámetros fundamentales que permitan estabilizar dichos sistemas.
- Desarrollar una herramienta teórica para la toma de decisiones en la administración y diseño de sistemas agrícolas, así como en el manejo de los recursos naturales y la conservación del medio ambiente

## 1.5. Organización de la tesis

En el capítulo segundo de este trabajo se da un resumen del marco teórico (Termodinámica de Procesos Irreversibles) en el que se basa este trabajo.

En el capítulo tres de este trabajo se presenta un resumen de fisiología vegetal; donde se describe una célula vegetal, se identifican las partes de una planta, los procesos metabólicos que ocurren en esta, así como las ecuación básicas físicas (termodinámicas), químicas y biológicas que los describen.

En el capítulo cuatro de este trabajo se da una visión conceptual general sobre ecosistemas y agroecosistemas.

En el capítulo quinto de este trabajo se hace una revisión de los distintos acercamientos para modelar y analizar; un ecosistema, un agroecosistema y estructuras biológicas disipativas. Con énfasis en los acercamientos que utilizan termodinámica de procesos irreversibles.

En el capítulo sexto se muestra un modelo basado en termodinámica de procesos irreversibles desarrollado por Sverizhev [22]. Donde se dice las ventajas que tiene sobre el otros modelos, y desventajas del modelo, que problemas deja abiertos. Y se concluye con un camino a seguir para desarrollar un modelo.

En el séptimo capítulo se muestran las contribuciones teóricas de esta tesis sobre ecosistemas, agroecosistemas y estructuras biológicas disipativas. En la primera sección se muestra un modelo sobre el tiempo de vida útil de las estructuras disipativas, en la segunda sección se introduce el concepto de daño funcional, en la tercera sección se analiza como el incremento de la función disipación de Rayleigh respecto a su valor mínimo afecta el tiempo de vida de una estructura disipativa, en la cuarta sección se muestra un modelo del envejecimiento celular, en la quinta sección se analiza el ritmo metabólico total de los mamíferos, en la sexta sección se realiza una descripción termodinámica de las etapas de desarrollo de un ser vivo en particular de un humano, en la séptima sección se explica el efecto de la radiación gama en las semillas y su crecimiento posterior, en la octava sección se muestra un modelo del tiempo vida de las hojas

de las plantas. En la novena sección se muestra un modelo fenomenológico y mecanicista de un ecosistema a nivel abstracto y en la décima sección se muestra un modelo de un ecosistema y un agroecosistema a nivel de detalle, en el cual también se realiza un análisis comparativo entre un agroecosistema y un agrosistema, en la onceava sección se realiza un breve modelo y análisis de la respuesta de un cultivo a dos perturbaciones.

En el octavo capítulo se muestran las conclusiones de esta trabajo.

# Bibliografía

- [1] Richar C. Fluck y C. Direlle Baird, *Agricultural Energetics*, AVI publishing company inc. Westport, Connecticut, 1980 p. 9
- [2] D.S. Halacy Jr, *The Geometry of Hunger*, Harper & Row, Publishers, New York U.S.A.(1972).
- [3] Yu.M Svirezhev and A Svirejeva-Hopkins, *Sustentable Biosphere: critical overview of basic concept of sustainability*, Ecological Modelling 106 (1998): 47-61.
- [4] Conway, *The Properties of Agroecosystems*, Agricultural Systems (1987) 24 :95-117.
- [5] 3.- Alexander Tarasyev and Chihiro Watanabe. IIASA: Interim Report IR-99-001/ January 99. "Optimal control of R & D Investment in a Techno-Metabolic System". www.iiasa.ac.at
- [6] <http://www.adbio.com/science/agri-history.htm>
- [7] Pedro Reyes Castañeda, *Historia de la Agricultura*, AG, México, D.F (1997)
- [8] Adres Montemayor, *Planeación energética estratégica*, Tesis para obtener el grado de Ingeniero en Mecánica, Facultad de Ingeniería, UNAM, (1991), (dirigida por el Dr. Jorge A. Montemayor-Aldrete).
- [9] Pimentel, D. (Ed), *Handbook of Energy Utilization in Agriculture.*, CRC Press, Boca Raton, FL, (1980) 475 pp.
- [10] Mario Gianprietto, *Socioeconomic pressure, demographic pressure, environmental loading and technological changes in agriculture*, Agricultural Ecosystem and Environment (1997) 65: 201-229.
- [11] Mario Gianprietto, Sandra G. F. Buckkens, y David Pimentel, *General Trends of Technological Changes in Agriculture*, Critical Reviews in Plant Sciences, (1999) 18(3) : 261-282
- [12] Piero Conforti y Mario Giampietro, *Fossil energy use in agriculture : an internacional comparison*, Agriculture Ecosystem and Environment ( 1997) 65 : 231-243
- [13] Stephen R. Gliessman , Eric Engles y Robin Krieger, *Agroecology: Ecological Processes in Sustainable Agriculture*, (1997)

- [14] Sandra L. Postel, *Water for Food Production: Will there Be Enough in 2025*, Bioscience Vol. 18 No. 18 : 629-637.
- [15] *Estado actual de la agricultura*, (1998), <http://www.fao.org>
- [16] Anne H. Ehrlich, *Implications of Population Pressure on Agriculture and Ecosystem*, Avances in Botanical Research Vol. 21, : 79-100.
- [17] Lester R. Brown, *How water scarcity will shape new century*, Water Science and Technology, (2001)Vol 43 No4 pp. 17-22, .
- [18] Yudelman M. (1994), *The future role of irrigation in meeting the world's food supply*. En *Soil Water Science: Key to understanding Our Global Environment*, Madison (WI): Soil Science Society of America
- [19] Rosamond L. Naylor, *Energy and Resource constraints on intensive agricultural production*, Annual Reviews Energy Environmental, (1996) 21: 99-123.
- [20] Sylvie Bonny, *Is Agriculture Using More and More Energy?*, Agricultural systems (1993) 43 : 51-66
- [21] <http://www.fao.org>
- [22] Yu. M Svirezhev, *Thermodynamics and Ecology*, Ecological Modelling, (2000)132 :11-22

## Capítulo 2

# Marco Teórico (Termodinámica de Procesos Irreversibles)

### 2.1. Aspectos Generales

La Termodinámica de Procesos Irreversibles, nos permite tratar con sistemas complejos, fuera de equilibrio, abiertos y disipativos, en los cuales una gran cantidad de fenómenos interactúan, de una manera acoplada. Por ejemplo una célula, el cuerpo humano, un agroecosistema, la Tierra, la red eléctrica, etc. En este marco teórico, los análisis se hacen básicamente en términos de la tasa de producción de entropía del sistema y del estudio de las relaciones que existen entre los de flujos y las fuerzas generalizadas que los producen.

Nota: en este capítulo suponemos por parte del lector un conocimiento a detalle de la termodinámica de equilibrio.

### 2.2. Conservación de masa

#### 2.2.1. Conservación de masa en sistemas cerrados

Para un sistema cerrado con  $n$  componentes químicos en el cual ocurren  $r$  reacciones químicas, el cambio en la masa del  $\gamma$ -ésimo componente está dado por la siguiente ecuación.

$$dm_\gamma = M_\gamma \sum_{\rho=1}^r \nu_{\gamma\rho} d\xi_\rho \quad (2.1)$$

donde  $\nu$  es el coeficiente estequiométrico de la reacción (con signo positivo para los productos y signo negativo para los ingredientes),  $M_\gamma$  es la masa molar de la  $\gamma$ -ésimo componente y  $d\xi_\rho$  es el grado de avance de  $\rho$ -ésima reacción. Como en la química no radiactiva no hay creación

ni destrucción de materia solo transformación de una componente a otra, en este sistema se satisface que

$$dm = \sum_{\rho=1}^n dm_{\gamma} = 0 \quad (2.2)$$

donde  $dm$  es el cambio total en la masa del sistema.

De la ec. (2.2) tenemos que el conjunto de ecuaciones estequiométricas está dado por

$$\sum_{\rho=1}^r \nu_{\gamma\rho} d\xi_{\gamma} = 0 \quad (2.3)$$

### 2.2.2. Conservación de masa en sistemas abiertos

Para un sistema abierto, en el cual ocurren reacciones, con  $n$  componentes químicos, el cambio en la masa de  $\gamma$ -ésimo componente, se expresa como la suma del cambio debido al intercambio de materia con el exterior ( $d_e m_{\gamma}$ ), y el cambio debido a las  $r$  reacciones ocurridas dentro de sistema. Es decir

$$dm_{\gamma} = d_e m_{\gamma} + d_i m_{\gamma} = d_e m_{\gamma} + M_{\gamma} \sum_{\rho=1}^r \nu_{\gamma\rho} d\xi_{\gamma} \quad (2.4)$$

Por conservación de masa, tenemos que el cambio en la masa total del sistema es igual al cambio de masa debido a un intercambio de materia con el exterior

$$dm = d_e m \quad (2.5)$$

En general la ec. (2.5) es aplicable a cualquier propiedad extensiva del sistema abierto.

## 2.3. Conservación de Energía (Primera ley de la termodinámica)

En un sistema termodinámico se puede escoger un conjunto de variables independientes, con las cuales se puede, caracterizar el estado del sistema. Y así a una función que pueda expresarse en términos de estas variables se le conoce como función de estado.

La primera ley de la termodinámica postula la existencia de una función de estado, llamada energía,  $U$ , la cual sirve para caracterizar la energía contenida en el sistema.

### 2.3.1. Conservación de energía para sistemas cerrados

En un sistema cerrado con volumen  $V$ , en el que solo tenemos intercambio de energía con el exterior, el sistema puede hacer trabajo mecánico sobre los alrededores y viceversa. Si actúa

una presión perpendicular a la superficie del sistema o de los alrededores, entonces el cambio temporal de la energía interna,  $U$ , del sistema puede expresarse como la diferencia entre el flujo de energía calorífica proporcionada al sistema,  $dQ$  y el flujo de energía mecánica liberada o recibida por el sistema,  $PdV$  (esto se refleja en el signo del segundo término de la ecuación (2.6)).

$$dU = dQ - PdV \quad (2.6)$$

Si se toma en cuenta que un sistema cerrado tiene cambios internos, caracterizados por la variable  $\xi$  y además tenemos como variables independientes, el volumen ( $V$ ), la Temperatura ( $T$ ), y el número de moles ( $n_1, \dots, n_c$ ). Expresamos a la  $U$ , como  $U = U(T, V, \xi)$ , y la diferencial total de la  $U$  como (utilizando la regla de la cadena)

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_{T,\xi} dV + \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_{V,\xi} dT + \left(\frac{\partial U}{\partial \xi}\right)_{V,T} d\xi \quad (2.7)$$

Si introducimos una función de estado llamada Entalpía ( $H = U + pV$ ), la ecuación de conservación de energía la podemos reescribir como

$$dH = dQ + VdP \quad (2.8)$$

de donde vemos que para un proceso isobárico ( $P = cte$ ), la variación en la entalpía es igual a la cantidad de calor absorbida por el sistema

Desarrollando la diferencial de  $H$ , en función de las variables ( $P, T, \xi$ ) se obtiene

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_{P,\xi} dT + \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_{T,\xi} dP - \left(\frac{\partial H}{\partial \xi}\right)_{T,P} d\xi \quad (2.9)$$

donde:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_{P,\xi} = C_{p,\xi}; \quad \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_{T,\xi} = h_{T,\xi} + V; \quad \left(\frac{\partial H}{\partial \xi}\right)_{T,P} = -r_{T,P} \quad (2.10)$$

### 2.3.2. Conservación de energía para sistemas abiertos

En un sistema abierto, hay intercambio tanto de energía como de materia con el exterior, por lo ( $dQ$ ) se reemplaza por un termino más general ( $d\phi$ ) que es el flujo de energía durante un intervalo de tiempo  $dt$ , debido a transferencia de calor e intercambio de materia. Por lo que la primera ley para sistemas abiertos la podemos reescribir como

$$dU = d\phi - PdV \quad (2.11)$$

Así el cambio en la entalpía para un sistema abierto queda definida como

$$dH = d\phi + VdP \quad (2.12)$$

## 2.4. Producción de Entropía (Segunda ley de la termodinámica)

En general, decimos que un proceso es reversible si las ecuaciones que describen a este son invariantes ante la transformación de invertir el signo del tiempo. Si no es así, decimos que es irreversible. De manera cualitativa conforme un proceso sea más disipativo de energía es más irreversible. Generalmente todo los procesos biológicos y fisico-químicos, tales como la difusión, transporte de iones en membranas celulares, etc. son procesos irreversibles. Para caracterizar mejor a un sistema, se postula una función de estado llamada Entropía ( $S$ ). La cual es una propiedad extensiva del sistema.

En general el cambio en la entropía total de un sistema abierto se expresa como la suma del cambio en la entropía debido a un intercambio de energía y materia con el exterior ( $d_e S$ ) y el cambio en la producción interna de entropía ( $d_i S$ ), debida a procesos internos dentro del sistema.

$$dS = d_e S + d_i S \quad (2.13)$$

El termino  $d_i S$  sólo puede ser mayor que o igual a cero. Cuando es igual a cero se dice que el proceso es reversible, es decir después de una transformación el sistema se encuentra en el mismo estado en que comenzó (no hubo disipación de energía). Cuando es mayor que cero se dice que el proceso es irreversible, es decir después de una transformación no se encuentra en el mismo estado en que comenzó (hubo disipación de energía).

Para un sistema aislado la ecuación (2.13), se reduce a

$$dS = d_i S \geq 0 \quad (2.14)$$

### 2.4.1. Generación de entropía para un sistema cerrado de una componente

La generación de entropía para un sistema cerrado de una componente se expresa como

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (2.15)$$

donde  $T$  es la temperatura absoluta del sistema. Utilizando la primera ley de la termodinámica dada por la ec. (2.6), podemos escribir la ec. (2.15) como

$$dS = \frac{dU + PdV}{T} \quad (2.16)$$

### 2.4.2. Generación de entropía en sistemas abiertos, sin reacciones químicas entre sus componentes

En un sistema abierto hay un cambio en el numero de moles ( $n_1, \dots, n_c$ ) de las componente químicas del sistema (aún sin reacciones químicas), por el hecho de que este intercambia materia

con su exterior. Entonces la rapidez de generación de entropía del sistema se expresa como

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{T} \frac{dU}{dt} + \frac{P}{T} \frac{dV}{dt} - \sum_{\gamma} \frac{\mu_{\gamma}}{T} \frac{d_e n_{\gamma}}{dt} \quad (2.17)$$

Donde  $\mu_{\gamma}$ , es llamado potencial químico y queda definido de las siguientes formas

$$\mu_{\gamma} = -T \left( \frac{\partial S}{\partial n_{\gamma}} \right)_{U, V, n'_{\gamma}} = -T \left( \frac{\partial U}{\partial n_{\gamma}} \right)_{S, V, n'_{\gamma}} = -T \left( \frac{\partial G}{\partial n_{\gamma}} \right)_{T, P, n'_{\gamma}}$$

donde  $n'_{\gamma}$  denota todos los números de moles ( $n_1 \dots n_c$ ), con excepción de  $n_{\gamma}$ ,  $G$  es la función de Gibbs

### 2.4.3. Potencial químico

Nosotros podemos asignar a cada componente químico en un sistema una energía libre por unidad de mol de tal especie. Así el cambio en la energía del sistema es proporcional al cambio en la masa de las especies químicas en este. En general el potencial químico de un componente  $i$ , ( $\mu_i$ ), [J/mol] puede ser calculado a partir de su concentración ( $c_i$ ) o de su actividad química ( $a_i$ ) como

$$\mu_i = \mu_i^* + RT \ln a_i \quad (2.18)$$

$$a_i = f_i c_i$$

donde  $\mu_i^*$  es el potencial químico en el equilibrio,  $R$  es la constante universal de los gases,  $f_i$ , es el coeficiente de actividad. En soluciones ideales,  $f_i = 1$ , que es cuando la actividad de la sustancia disuelta es igual a su concentración  $c_i$  [6].

### 2.4.4. Generación de entropía en sistemas cerrados, con reacciones químicas entre sus componentes:

Cuando en los sistemas cerrados se llevan a cabo reacciones químicas entre sus componentes, la generación de entropía está dada por

$$dS = \frac{dQ}{T} + A \frac{d\xi}{T} \quad (2.19)$$

donde  $A$  es la afinidad química de la reacción, la cual queda relacionada con los potenciales químicos que intervienen en la reacción, de la siguiente forma

$$A \equiv - \sum_{\gamma} \nu_{\gamma} \mu_{\gamma} \quad (2.20)$$

Comparando la ec.(2.13), con la ec. (2.19), tenemos que el cambio en la producción de interna y externa de entropía están dadas por

$$d_i S = A \frac{d\xi}{T} \geq 0 \quad \text{y} \quad d_e S = \frac{dQ}{T} \quad (2.21)$$

Cuando los potenciales químicos de las  $\gamma$  componente se igualan, se alcanza un equilibrio termodinámico es decir  $A = 0$ , lo cual no indica que los flujos sean cero, ya que pueden existir todavía flujos de materia en direcciones contrarias, tal que el flujo neto sea cero. En equilibrio todos los flujos son cero.

Si el sistema supuesto es cerrado, y se generaliza a una serie de reacciones químicas en su interior, entonces la generación interna de entropía queda definida por

$$diS = \frac{1}{T} \sum_{\rho}^r A_{\rho} d\xi_{\rho} \quad (2.22)$$

donde  $A_{\rho}$  es la afinidad de la  $r$ -ésima reacción, de forma que

$$A_{\rho} = - \sum_{\gamma}^r \nu_{\gamma\rho} \mu_{\gamma} \quad (2.23)$$

Así la producción de rapidez de generación de entropía interna del sistema de  $r$  reacciones químicas, está dada por

$$\frac{diS}{dt} = \frac{1}{T} \sum_{\rho}^r A_{\rho} v_{\rho} \quad (2.24)$$

donde hemos definido a  $v_{\rho}$  como  $v_{\rho} \equiv \frac{d\xi_{\rho}}{dt}$ .

De la ecuación anterior, se puede deducir que la rapidez de generación de entropía, originada dentro del sistema, es igual a la suma de la rapidez de generación individual de entropía de cada una de las reacciones químicas que se llevan a cabo.

De la ec. (2.24), podemos ver que para reacciones simultáneas puede suceder que  $A_1 v_1 < 0$  y  $A_2 v_2 > 0$  siempre que  $A_1 v_1 + A_2 v_2 > 0$

Las velocidades de las reacciones  $v_{\rho} = d\xi_{\rho}/dt$  (tasa de reacción), y las afinidades ( $A_{\rho}$ ) (fuerzas química) están relacionadas con las velocidades de activación (construcción de estructura molecular nueva),  $\vec{v}_{\rho}$ , y con las velocidades de desactivación (destrucción de la estructura molecular que será producto),  $\overleftarrow{v}_{\rho}$ , a través de las siguientes relaciones

$$v_{\rho} = (\vec{v}_{\rho} - \overleftarrow{v}_{\rho}) \quad (2.25)$$

$$A_{\rho} = RT \ln \left( \frac{\vec{v}_{\rho}}{\overleftarrow{v}_{\rho}} \right) \quad (2.26)$$

$$\vec{v}_{\rho} = \vec{k}_{\rho} (x_{\rho 1}^{\nu_{\rho 1}} \cdots x_{\rho i}^{\nu_{\rho i}}) \quad \text{y} \quad \overleftarrow{v}_{\rho} = \overleftarrow{k}_{\rho} (x_{\rho 1}^{\nu_{\rho 1}} \cdots x_{\rho p}^{\nu_{\rho p}}) \quad (2.27)$$

donde  $\vec{k}_{\rho}$ ,  $\overleftarrow{k}_{\rho}$  son las constantes de activación y desactivación de cada reacción respectivamente,

$R = 8,314510 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $x_{\rho 1}^{\nu_{\rho 1}} \cdots x_{\rho i}^{\nu_{\rho i}}$  es el producto de los componentes ingredientes elevados a su coeficiente estequiométrico en la  $\rho$ -ésima reacción,  $x_{\rho 1}^{\nu_{\rho 1}} \cdots x_{\rho p}^{\nu_{\rho p}}$  es el producto de los componentes productos elevados a su coeficiente estequiométrico en la  $\rho$ -ésima reacción.

La constantes activación o desactivación según Arrhenius son de la forma  $k = k_o \exp[-E_a/RT]$  donde  $E_a$  es conocida como energía de activación de la reacción. Pero en general la energía de activación esta dada por [1]

$$k = \kappa(k_B T/h) \exp[-\Delta G/RT] \quad (2.28)$$

donde,  $k_B$  es la constante de Boltzmann,  $h = 6,6260755 \times 10^{-34} \text{ J s}$  es la constante de plank,  $\Delta G$  es la energía libre de Gibbs,  $\kappa$  es un término pequeño del orden de 1, característico de cada reacción. Usando (2.26) en (2.25) podemos expresar a la velocidad de la  $\rho$ -ésima reacción como

$$v_\rho = \vec{v}_\rho (1 - e^{-A_\rho/RT}) \quad (2.29)$$

La aproximación de (2.29) cerca del equilibrio químico ( $A_\rho/RT \ll 1$ ), está dada por.

$$v_\rho = \sum_j L_{\rho j} \frac{A_j}{T} \quad \text{con } L_{\rho j} = \frac{\vec{v}_{\rho,eq}}{R} \quad (2.30)$$

donde  $\vec{v}_{\rho,eq}$  es el porcentaje directo de reacción cerca del equilibrio de la  $\rho$ -ésima reacción[1].

#### 2.4.5. Generación de entropía para sistemas abiertos con reacciones químicas en su interior

La rapidez de generación de entropía para un sistema abierto, dentro del cual se llevan a cabo varias reacciones químicas, está dada por:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{T} \frac{d\phi}{dt} - \sum_\gamma \frac{\mu_\gamma}{T} \frac{d_e n_\gamma}{dt} + \frac{1}{T} \sum_\rho A_\rho v_\rho \quad (2.31)$$

Para sistemas continuos en los cuales las variables intensivas como la  $T, P, A$ , no solo dependen del tiempo sino también de las coordenadas espaciales, existe la termodinámica de procesos extendida, la cual contiene los mismos principios físicos que la termodinámica de procesos irreversibles, con unas matemáticas más elaboradas. Por los objetivos del trabajo y la brevedad de la introducción, esta no se trata aquí.

Por otra parte, existe otro tipo de sistemas, que involucran procesos en los cuales los grados de libertad de las moléculas (tales como deformación por flujo, orientación respecto de campos eléctricos, etc.), tienen valores continuos

$$dS = dE/T + (P/T)dV - \int_\gamma \mu(\gamma) \frac{\partial n(\gamma)}{\partial t} d\gamma \quad (2.32)$$

## 2.4.6. Consideraciones generales sobre la producción de entropía y los procesos irreversibles.

La rapidez de generación de entropía de un sistema, puede ser escrita como la suma de los productos de las fuerzas generalizadas (ó afinidades) y los correspondientes flujos generalizados de los procesos irreversibles dentro del sistema, divididos por la temperatura absoluta.

¿Cuál es el significado físico que tiene la producción de entropía?. En un sistema mecánico la velocidad ( $v$ ) representa el flujo, cuyas unidades generales son  $[m/s]$  y este flujo es debido a una fuerza  $F$  cuyas unidades son  $[m.kg/s^2]$  entonces las unidades del producto  $v.F$  son  $[(m_2kg/s^2)/s] = [Joules/s] = [Watt]$ , las cuales son unidades de potencia, por lo tanto la rapidez de generación de entropía está relacionada con la potencia consumida o disipada por el sistema divididos por la temperatura absoluta de ahí su importancia para el análisis energético de un sistema.

Si denotamos a los flujos generalizados como  $J_k$  y a las fuerzas generalizadas como  $X_k$ . La rapidez de generación de entropía interna de un sistema se puede escribir como:

$$\frac{d_i S}{dt} = \sum_k^n J_k X_k > 0 \quad (2.33)$$

## 2.4.7. Propiedades Generales de la producción de entropía son:

1. Para entender mejor un proceso dado, a veces se requiere hacer una transformación de las afinidades  $X_k$ , y flujos generalizados  $J_k$ , por un nuevo conjunto de afinidades  $X'_k$  dependientes linealmente de  $X_k$  y un nuevo conjunto de flujos generalizados  $J'_k$  dependientes linealmente de  $J_k$ , tal que:

$$\sum_k J_k X_k = \sum_k J'_k X'_k \quad (2.34)$$

2. Cuando la rapidez de generación de entropía es cero, el proceso irreversible alcanza el equilibrio termodinámico, y se cumple que:

$$J_k = 0 \quad y \quad X_k = 0 \quad (2.35)$$

Se puede suponer que muy cerca del equilibrio existen relaciones lineales entre los flujos y las fuerzas generalizadas (primer termino de la ec. (2.33) en un desarrollo en serie de Taylor alrededor del equilibrio), ejemplos de estas relaciones son las conocidas leyes fenomenológicas de Fick, Fourier, Ohm, Etc. A estas relaciones las podemos escribir en forma general como:

$$J_i = \sum_j L_{ij} X_j \quad (2.36)$$

Los coeficientes  $L_{ij}$  son conocidos como coeficientes fenomenológicos. Ejemplos de  $L_{ii}$ , son los coeficientes de difusividad, de conductividad térmica, de conductividad eléctrica, etc. Por otra parte, los coeficientes  $L_{ij}$  (donde  $i \neq j$ ) describen la interferencia o acoplamiento entre los procesos irreversibles  $j$  e  $i$  que ocurren simultáneamente en el mismo sistema.

Existe una relación de reciprocidad dada por el **teorema de Onsager**, que dice el flujo que corresponde al proceso irreversible  $i$ , es influenciado por la afinidad  $X_j$  del proceso irreversible  $j$ , entonces el flujo  $j$  es también influenciado por la afinidad  $X_i$ , a través del mismo coeficiente de interferencia  $L_{ij}$ . Lo cual se expresa como:

$$L_{ij} = L_{ji} \quad (2.37)$$

Existe otra ley conocida como de **ley Curie**, que establece: que el acoplamiento entre procesos irreversibles solo se da sí estos poseen el mismo carácter tensorial. Por ejemplo de las reacciones químicas (procesos escalares) no pueden acoplarse a la conducción térmica y la difusión (procesos vectoriales).

Cabe señalar que las relaciones entre los flujos y las fuerzas generalizadas pueden ser no lineales, tal es el caso, cuando los coeficientes fenomenológicos dependen tanto de los flujos como de las fuerzas generalizadas, en este caso nos enfrentamos a problemas irreversibles no lineales.

#### 2.4.8. Entropía probabilidad y información

Boltzman (1894) relacionó la entropía de un sistema con el grado de desorden de un sistema mediante la siguiente ecuación.

$$S = k_B \ln(W) \quad (2.38)$$

donde  $S$  es la entropía del sistema,  $k_B = 1,3806568 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$  es la constante de Boltzaman y  $W$  es el parámetro de desorden, el cual es la probabilidad que el sistema pueda existir en un estado relativo a todos los posibles estados en lo que puede estar. Es importante mencionar que  $W$  tiene un valor de 1 a  $\infty$ .

Más tarde Einstein (1905) expresó la ec. (2.38) de la siguiente forma: La probabilidad de fluctuaciones en un sistema aislado cerca del equilibrio esta dada por

$$W = e^{\Delta s(\alpha)/k_B} \quad (2.39)$$

donde  $W$  es la probabilidad que los parámetros del sistema alcancen el valor  $\alpha$ ;  $\Delta s(\alpha) = S(\alpha) - S_0$ , con  $S_0$  la entropía del sistema en el equilibrio.

Shanon en (1962) introdujo un parámetro en la teoría de información, para relacionar la información con la probabilidad matemática de un evento mediante la siguiente relación.

$$I = K \ln P = -k_B \ln(P) \quad (2.40)$$

donde  $P$  = numero de casos favorables el más grande numero de casos. La cual tiene un valor entre cero y uno. Donde  $P = 1$  expresa absoluta incertidumbre. las unidades de  $I$  es un bit. Si aumenta entropía el sistema pierde infotmación[6].

### 2.4.9. Estados estacionarios

Cuando en un sistema las variables de estado no dependen del tiempo, se dice que el sistema se encuentra en estado estacionario. Se debe hacer énfasis en la diferencia que se tiene respecto a los estados en equilibrio, ya que éstos se caracterizan en el regimen lineal por una producción cero de entropía; mientras los sistemas en estado estacionario se caracterizan por tener una mínima producción de entropía, y requieren para mantenerse un suministro constante de potencia externa para sostener su estructura disipativa.

Ya que en estado estacionario la rapidez de generación de entropía no varía con el tiempo, los cambios en las fuerzas generalizadas, no provocan cambios en la producción de entropía; es decir:

$$\frac{\partial}{\partial X_m} \left( \frac{d_i S}{dt} \right) = 0 \text{ ó } J_m = 0 \quad (2.41)$$

Un estado estacionario es el estado de mínima rapidez de generación de entropía en el cual, los flujos correspondientes a fuerzas bajo constricción alcanzan un valor constante, mientras que los flujos correspondientes a fuerzas sin constricción alcanzan un valor constante igual a cero. Aunque los estados estacionarios se obtienen a través de consideraciones cinéticas, la minimización de la rapidez de generación de entropía proporciona una manera alternativa, para sistemas lineales.

### 2.4.10. Flujo de entropía en los estados estacionarios

En los estados estacionarios, las variables son independientes respecto del tiempo, por lo tanto queda claro que la rapidez de generación de entropía del sistema debe ser compensada mediante un flujo negativo de entropía hacia el sistema,  $d_e S/dt$  de forma que el rapidez de generación de entropía total del sistema sea cero.

$$\sigma = \frac{dS}{dt} = \frac{d_i S}{dt} + \frac{d_e S}{dt} \quad (2.42)$$

Como la rapidez de generación interna de entropía, por parte del sistema es mayor que cero, necesariamente se debe cumplir que:

$$\frac{d_e S}{dt} < 0 \quad (2.43)$$

De las ecuaciones anteriores, se deduce que los estados estacionarios no pueden ocurrir en sistemas aislados del exterior, dado que se requiere proporcionar un flujo neto de negaentropía que compense exactamente un flujo neto de entropía hacia el exterior del sistema para así poder mantener el estado estacionario. En otras palabras los sistemas en estado estacionario requieren un flujo externo constante de potencia que realice el trabajo de sostener la estructura disipativa del sistema al reponer el orden perdido por la generación de entropía dentro del sistema; garantizado que el cambio total de entropía del sistema sea cero  $dS/dt = 0$  (sólo en estado estacionario). Esto es se requiere de una potencia externa que aporte una rapidez de creación

de estructura disipativa igual de la destrucción de la misma.

Experimentalmente existen una gran variedad de sistemas que pueden existir en estado estacionario, desde sistemas complejos tales como reacciones químicas, hasta organismos vivos, ya que éstos cumplen con gran exactitud las características de los sistemas estacionarios.

#### 2.4.11. Estabilidad de estados estacionarios cerca del equilibrio

Las fluctuaciones cerca de un estado de equilibrio decrecen la producción de entropía y los procesos irreversibles conducen al sistema hacia el estado de equilibrio de máxima entropía, paralelamente a la disminución de la rapidez de generación de entropía.

Para un sistema cerrado la rapidez de generación de entropía total está dada por  $\sigma = d_i S/dt$  que es siempre es positiva definida

$$\sigma = \sum_k J_k X_k = \sum_k L_{ik} X_k^2 > 0 \quad (2.44)$$

Se puede mostrar que para un sistema cerrado la rapidez de generación de entropía sólo puede disminuir a través del tiempo, es decir.

$$\frac{d\sigma}{dt} < 0, \quad (2.45)$$

y eventualmente alcanzar un estado estacionario en el cual  $d\sigma/dt = 0$  con  $J_k$  y  $X_k$  iguales a cero sólo para fuerzas  $x_k$  no fijas.

Para un sistema abierto de la ec. (2.42) tenemos

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{d_i\sigma}{dt} + \frac{d_e\sigma}{dt}$$

Así de la ec. (2.45) tenemos que

$$\frac{d_i\sigma}{dt} < 0 \quad (2.46)$$

pero  $d_e\sigma/dt$  no tiene un signo definido.

La ec. (2.46) nos dice que la producción de entropía en el régimen estacionario cerca del equilibrio tiene un mínimo,  $d_i\sigma/dt = 0$  ("Principio de mínima producción de entropía"). Además de que el efecto perturbativo debido a las fluctuaciones en  $(d_e\sigma/dt)$ , cerca del estado estacionario, mueven a  $(d\sigma/dt)$  a un valor más alto, momentáneamente, y los procesos irreversibles ocurren de tal manera que ocasionan una disminución en la rapidez de generación de entropía llevándola nuevamente a su mínimo valor estacionario. A esta respuesta del sistema ante una perturbación externa se le conoce como el "Principio de Le-Chatelier-Braun Generalizado".

Las ec. (2.44) y la ec. (2.46) garantizan la estabilidad de un estado estacionario.

### 2.4.12. Acoplamiento de los estados estacionarios

Para procesos disipativos en estados estacionarios existen acoplamientos adicionales a aquellos que aportan los coeficientes de interferencia  $L_{ik} = L_{ki}$ . Por ejemplo consideremos un sistema de dos fases, a una fase la podemos considerar un sistema abierto y, a la otra el exterior del sistema. En el sistema ocurren cuatro procesos: un flujo de reactante del exterior hacia el interior del sistema, una reacción química en el interior, un flujo de producto de la reacción hacia el exterior e intercambio de materia inerte entre la interior y el exterior. De las ecuaciones fenomenológicas y las condiciones de estado estacionario para los flujos uno encuentra de manera sorprendente que aparece una diferencia de concentración en la componente inerte entre el interior y exterior del sistema abierto. Es decir, la afinidad del componente inerte depende de la velocidad de la reacción química. A este tipo de acoplamiento entre un fenómeno de transporte y una reacción química que no están ligados directamente a través de la leyes fenomenológicas se les denomina acoplamiento estacionario. Este fenómeno es muy importante para procesos biológicos. En particular dentro de una célula viva se puede tener una distribución estacionaria de materia fuera de equilibrio termodinámico, la cual difiere de aquella que existe en el medio ambiente exterior a la célula por cantidades que son determinadas por la rapidez del metabolismo dentro de la célula.

## 2.5. Termodinámica de los procesos irreversibles no lineales

Si se toma la siguiente convención sobre la rapidez de generación de entropía,  $\sigma$  dentro de un sistema:

$$\sigma = \frac{d_i S}{dt} = \sum_k J_k X_k \geq 0 \quad (2.47)$$

Entonces, para procesos irreversibles no lineales que ocurren lejos del equilibrio termodinámico, las relaciones fenomenológicas son de la forma  $J_k = f(X_k)$ , por lo tanto la rapidez de generación de entropía está afectada tanto por los flujos como por las fuerzas generalizadas, entonces tenemos que:

$$d\sigma = d_X \sigma + d_J \sigma = \sum_k J_k dX_k + \sum_k X_k dJ_k \quad (2.48)$$

Si por otra parte, consideramos que:

$$d_X \sigma = \sum_k J_k dX_k = \sum_{kl} (L_{kl} X_l) dX_k = \sum_{kl} X_l (L_{kl} dX_k) = \sum_l X_l dJ_l = d_J \sigma \quad (2.49)$$

Entonces:

$$d_X \sigma = d_J \sigma = (d\sigma/2) \quad (2.50)$$

La contribución del cambio en el tiempo de las fuerzas generalizadas, en la rapidez de generación de entropía, siempre es negativa ó cero, de forma que:

$$\frac{d_X \sigma}{dt} \leq 0 \quad (2.51)$$

Esta ecuación es el criterio más general de evolución de un sistema no lineal lejos del equilibrio hacia un estado estacionario, y se le conoce como "Principio Glansdorff-Prigogine".

La ecuación anterior, es válida, sólo cuando las condiciones de frontera son independientes respecto del tiempo, de forma que la desigualdad (2.51), es el resultado más general sobre la termodinámica de procesos irreversibles.

La ecuación (2.51) se puede ampliar para incluir procesos de flujo volumétrico, en este caso existe un variable  $d\phi$ , de forma tal que:

$$d\phi = \int_V (\sum_k J'_k dX'_k) dV \quad (2.52)$$

Donde las fuerzas  $X'_k$  y los flujos  $J'_k$ , incluyen procesos mecánicos, tales como términos relacionados con la convección. De forma que se puedan tratar con sistemas no homogéneos. La ec. (2.52), es una integral de volumen.

### 2.5.1. Estabilidad de estados estacionarios de procesos irreversible no lineales

El criterio más general de estabilidad de un sistema lejos del equilibrio esta dada por el teorema de estabilidad de Liapunov. El cual dice que si existe una función de estado positiva definida ( $V_L(X) > 0$ ) en una vecindad de un estado estacionario con su derivada con respecto al tiempo es semi-negativa ( $\dot{V}_L(X) \leq 0$ ) definida localmente en la vecindad; entonces el estado estacionario es estable y, aun más, si la derivada es estrictamente negativa definida entonces la estabilidad es asintótica, es decir se garantiza que después de una perturbación alrededor del estado estacionario se retorna a este. A la función que satisface esta propiedad se le conoce como función de Lyapunov ( $V_L(X)$ ).

Consideremos a la  $S$  como función de un estado fuera de equilibrio, con  $S_0$  su valor en su estado de referencia cuya estabilidad se estudia. Si se expande a  $S$  alrededor de  $S_0$  y obtiene

$$S = S_0 + \delta S + \frac{1}{2} \delta^2 S \quad (2.53)$$

$$\Delta S = \delta S + \frac{1}{2} \delta^2 S \quad (2.54)$$

Como en un estado estacionario fuera de equilibrio los flujos de materia y energía no desaparecen, entonces la primera variación  $\delta S \neq 0$  (en equilibrio termodinámico está termino desaparece). Se puede demostrar que la segunda variación tiene un signo negativo

$$\frac{1}{2}\delta^2 S < 0 \quad (2.55)$$

y que

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta^2 S}{2} \right) = \sum_k \delta X_k \delta J_k \quad (2.56)$$

Este término es conocido como exceso de entropía, que para sistemas cerca de equilibrio es la producción entropía

$$\sum_k \delta X_k \delta J_k = \sum_k X_k J_k > 0. \quad (2.57)$$

Para estados lejos del equilibrio, el incremento en la producción de entropía está dada por la ec. (2.48). De la ecuación (2.55) tenemos que

$$-\frac{1}{2}\delta^2 S > 0 \quad (2.58)$$

por lo tanto  $-(\delta^2 S/2) > 0$  es función de Lyapunov si

$$\frac{d}{dt} \left( -\frac{\delta^2 S}{2} \right) < 0 \quad \text{ó} \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\delta^2 S}{2} \right) > 0 \quad (2.59)$$

Si un estado estacionario lejos del equilibrio termodinámico satisface la ec. (2.58) y la ec. (2.59) entonces decimos que es asintóticamente estable.

Si la desigualdad dada por (2.59) es violada solo significa que el sistema puede ser inestable. Esta una condición necesaria pero no suficiente para inestabilidad[2].

## 2.6. Orden y disipación

En general se puede decir que los procesos de disipación de energía que se llevan a cabo lejos del estado de equilibrio, pueden desarrollar fenómenos de oscilación alrededor de los estados estacionarios, de forma que pueden crear cierto orden dentro del sistema (un decremento de la entropía), el cual permite realizar la disipación con una mayor eficiencia que a al sistema original.

Para ejemplificar lo anteriormente señalado, se puede mostrar el siguiente caso:

Supóngase que se tiene un recipiente con un líquido en su interior, de forma que se calienta por la parte inferior durante un cierto periodo de tiempo. Si el calor suministrado es relativamente pequeño, la transferencia de calor (disipación) se realiza mediante conducción a través del fluido. Si se incrementa el gradiente de temperatura, entonces existen efectos de convección dentro del recipiente que organizan el movimiento del fluido en un patrón casi simétrico de celdas convectivas, de forma que la disipación de energía se lleva a cabo de una forma más eficiente. El movimiento organizado del fluido requiere energía cinética, el valor de la disipación,

tiene en consecuencia una disminución en la entropía media del fluido dada por:

$$\Delta S = -\frac{E_{cin}}{T} \quad (2.60)$$

Donde  $T$ , es la temperatura media que caracteriza al sistema, y  $E_{cin}$  es la energía cinética del líquido debido a los efectos convectivos.

Como comentarios generales respecto a los estados estacionarios se puede decir que:

Si los estados estacionarios ocurren cerca del estado de equilibrio, se encuentran regidos por el teorema de mínima generación de entropía. Y si los estados estacionarios ocurren lejos del estado de equilibrio, pueden presentarse oscilaciones en las variables importantes alrededor de los valores de estado estacionario, estas oscilaciones pueden dar lugar a fenómenos de reorganización, lo cual tiene como consecuencia una disminución de la entropía, permitiéndose una disipación más eficiente.

En el dominio de validez de  $d_i S/dt = \sum J_k X_k$  el exceso de entropía  $\delta^2 S$  también determina la probabilidad de pequeñas fluctuaciones alrededor de un estado de referencia.

$$W = \exp\left(\frac{\delta^2 S}{2}\right)/k$$

Esta expresión proporciona una generalización para situaciones de no equilibrio de la célebre fórmula de Einstein para describir la distribución de pequeñas fluctuaciones alrededor del equilibrio.

Sabemos que, las fluctuaciones (desviaciones respecto a un régimen promedio) son fenómenos universales de origen molecular y están siempre presentes en sistemas con muchos grados de libertad.

Así un sistema en un estado cercano al promedio, cerca de un umbral de transición, tiene la probabilidad de alcanzar la región inestable a través de fluctuaciones. Cuando esto pasa, cierto tipo de fluctuaciones pueden ser amplificadas y pueden subsecuentemente mover el sistema hacia un nuevo régimen ordenado estable.

En la vecindad del régimen estable, la evolución es esencialmente determinista en el sentido, de que las fluctuaciones que surgen son continuamente frenadas. Pero cerca del umbral de transición, la evolución se convierte en un proceso estocástico[3].

## 2.7. Termodinámica de la Evolución

La idea principal en la Termodinámica de la Evolución es la posibilidad de que un sistema prebiológico pueda evolucionar a través de una sucesión de transiciones que la dirigen a estados organizados, jerárquicamente cada vez más complejos. Tales transiciones sólo surgen en sistemas no lineales que están lejos del equilibrio; ya que a través de fluctuaciones cruzan cierto umbral crítico a partir del cual el régimen estacionario previo se hace inestable, con lo cual el sistema evoluciona a una nueva configuración estacionaria. Esta habilidad del sistema para evolucionar a través de inestabilidades sucesivas, da lugar a que cada transición favorezca que ocurra una evolución adicional que incrementa la no linealidad del sistema disipativo de

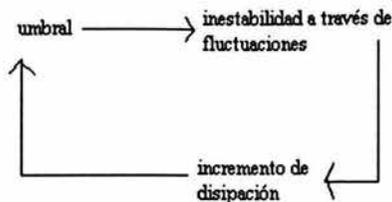


Figura 2-1: Retroalimentación Evolutiva

complejidad creciente y aumenta la distancia respecto al equilibrio. Cada transición habilita al sistema a incrementar la producción de entropía. Este mecanismo se puede visualizar como una retroalimentación evolucionaria. Ver figura 2-1.

Es importante insistir sobre la complementariedad entre este comportamiento, de incremento de la disipación, lo cual nosotros creemos que es esencial para evolución prebiótica, y la tendencia comúnmente observada en los sistemas fisicoquímicos cerca del equilibrio los cuales tienden hacia un estado de mínima disipación de energía o producción de entropía. Existen datos térmicos que aparentemente indican que el segundo tipo de comportamiento se mantienen para sistemas vivos después de un periodo inicial, el cual en organismos más grandes se extiende sólo sobre una fracción de la vida embrionaria. Uno está tentado a decir que sólo después de la síntesis de la sustancia clave necesaria para su supervivencia (lo cual implica un incremento en la disipación) un organismo tiende a ajustar su producción de entropía a un valor bajo, compatible con las constricciones exteriores. Este hecho puede conectarse probablemente con la idea de Darwin de "la supervivencia del mejor", por que a una baja razón de producción de entropía es semejante a darle a un organismo una ventaja selectiva [3].

Una conclusión de las estructuras disipativas es que existe una clase de sistemas que muestran dos clases de comportamientos: Una tendencia a un estado de máximo desorden para un tipo de situación y un comportamiento coherente para el segundo tipo. La *destrucción* de orden siempre prevalece en la vecindad de un equilibrio termodinámico. En contraste con la *creación* de orden puede ocurrir lejos del equilibrio con leyes cinéticas no lineales, más allá del dominio de estabilidad de los estados que tiene el comportamiento usual[3].

# Bibliografía

- [1] Dilip Kondepudi y Ilya Prigogine, *Modern Thermodynamics (from heat engines to dissipative structures)*, Jonh Wiley & Sons, (1998), England
- [2] Prigogine, I. , *Thermodynamics of Irreversible Processes*: John Wiley & Sons; (1955), England
- [3] Prigogine I. Nicolis G. y Babloyantz, *Thermodynamics of evolution*, Physics Today Nov (1972) pp. 23-28
- [4] Nicolis. G y Prigogine. I, *Self-Organization in Nonequilibrium Systems (From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations)*, Jonh Wiley & Sons, (1977).
- [5] Nicolis. G. *Bifurcations, Fluctuations and Dissipative Structures*, in Nonlinear Phenomena in Physics and Biology, Editado por Richar H.Enns, Billy L. Jones, Robert M. Miura, Sadanand S. Rangnekar, Plenum Press, New york (1981)
- [6] Roland Glaser, *Biophysics*, Springer, 1° edition, (1996).
- [7] *Thermodynamics of Biological Process*, Editado por Ingolf Lamprecht y A. I. Zotin, W de G de Gruyter, (1978).

## Capítulo 3

# Resumen de fisiología vegetal

### 3.1. Fisiología de una célula vegetal

#### Composición de un célula vegetal

La célula vegetal esta compuesta por un protoplasma que proporciona rigidez, una membrana celular llamada plasmalema, y el citoplasma que contiene una solución llamada cytol y organelos (cloroplastos, mitocondrias, nucleolos, etc). En las células maduras hay un gran fase central acuosa (90 % de volumen total de la célula) conocida como vacuola, la cual está rodeada por el tonoplasma, y en su interior contiene iones inorgánicos, ácidos orgánicos como solutos, azúcares y aminoácidos. Durante el crecimiento celular la vacuola toma agua[4].

### 3.2. Partes de una planta

Una planta puede ser dividida en dos sistemas, el sistema de brotes conformado por el tallo, las hojas, los brotes y los frutos y el sistema de raíces. El conjunto de hojas forman la *cubierta vegetal* de una planta.

Una planta es un sistema abierto que intercambia materia y energía con su medio ambiente, en este caso el medio ambiente de la planta es el suelo, la atmósfera, y la radiación solar. La planta intercambia materia con el suelo a través de su sistema de raíz, intercambia materia y energía con la atmósfera por medio del sistema de brotes o sistema foliar hojas.

Una parte de la energía y materia que fluye tanto del suelo como de la atmósfera hacia la planta se acumula como energía química en la forma de compuestos orgánicos, dando lugar a la biomasa de la planta. Y otra parte de la energía se disipa por los procesos metabólicos que ocurren dentro de la planta. Por está razón podemos considerar a una planta como estructura disipativa, ya que produce una estructura compleja a partir de transformación y degradación de fuentes externas de baja entropía.

### 3.2.1. Anatomía de las hojas

Las hojas en promedio tienen un espesor de 4-10 capas celulares, el tejido exterior es la *epidermis* (el citoplasma las células que lo forman no tienen color excepto las células guardianes o estomas) que se encuentra en el lado superior (haz) y inferior (envés) de la hoja. La epidermis tiene una *cutícula* (un polímero inerte) para controlar pérdidas de agua. Entre las capas epidermales se encuentra el *mesófilo*, tejido que contiene cloroplastos en dos tipos de células las *parénquima enempalizada* (alargadas y contiene el 70% de cloroplastos de la hoja) y las *esponjosas* (esféricas con más espacio de aire entre ellas). La ruta por la cual la hoja intercambia gases ( $CO_2$ ,  $H_2O$  y  $O_2$ ) es un espacio ajustable por unas células conocidas como *estomas* o *células guardianes* [4].

La función de las hojas es captar energía solar y convertirla en energía química por medio la fotosíntesis que ocurre en los cloroplastos.

### 3.2.2. El tallo y el sistema vascular

El *xilema* y el *floema* forman el sistema vascular de las raíces, tallo y hojas de la planta.

El xilema se encuentra en la parte central del tallo y de las raíces. Está formado por varias células estrechas y alargadas principalmente las *traqueidas* y las *vasos capilares*. A través de esta estructura se mueve el agua y los nutrientes (savia bruta) desde el suelo a las partes superiores de la planta, bajo la acción de un gradiente de presión hidrostática (fenómeno conocido como coheso-tenso-transpiración).

El floema se encuentra en la parte externa de tallo, raíces y hojas. A través de ellos se mueven los compuestos orgánicos sintetizados por la fotosíntesis (savia elaborada) en las hojas hacia regiones de la planta donde la concentración de estos es más baja. Este sistema vascular está formado por células llamadas *savie miembros* las cuales a diferencia de los *vasos capilares* siempre se mantienen metabólicamente activas [4].

La función del tallo es sostener a la planta y servir como medio de conducción de alimento entre distintas partes de la planta.

### 3.2.3. La Raíz

La punta de la raíz está formada de células de mucílago para reducir la fricción con las partículas del suelo, en seguida está la región del meristemo donde las células se dividen rápidamente, la siguiente región es la de elongación que es la que empuja mecánicamente la punta de la raíz o coifa a través del suelo. En una vista transversal el primer tejido de la raíz es la epidermis seguido de una capa de células conocidas como la *corteza* la cual contiene muchos espacios de aire los cuales permiten la difusión de  $O_2$  y  $CO_2$  dentro de este tejido. En lado interno de la corteza sigue una capa de células conocida como *endodermis*, la cual contiene *material cerozo* y *suberina* que forman una barrera alrededor de las células conocida como *¿cubierta desnuda?* la cual evita que el agua y solutos crucen por esta parte, forzándolos a pasar por las paredes laterales de las células endodérmicas hacia xilema.

Entre más saludable, vigoroso y mejor distribuido sea el sistema de raíz, mejor será la

toma de nutrientes. Las características principales de la raíz son su longitud tanto vertical como horizontal, y pelos radicales (finas proyecciones de la epidermis, dirigidas radialmente hacia afuera de la raíz). El área de superficie de la raíz  $A_r$  es un factor clave para la toma de nutrientes, entre más finas las raíces más se incrementa  $A_r$ . Las dos adaptaciones principales que ocurren en las plantas para aumentar  $A_r$  son los *pelos radicales* y la simbiosis con hongos (*Micorrizas*) con la raíz de la planta. Los pelos radicales tienen un longitud de 0.1-1.5 mm, en suelos con poco fósforo ( $P$ ) son más largos e incrementan la  $A_r$  de 2-10 veces; tienen un período de vida que va de pocos días a pocas semanas, pues continuamente son renovados. La *Micoriza*, consisten en una asociación simbiótica entre la raíz de la planta y hongos, los hongos obtienen fotosintetatos de la planta y la planta nutrientes como P, K y N. La Micoriza se puede extender más de tres pulgadas dentro el suelo incrementado arriba por más de 10 veces la  $A_r$ , es particularmente importante para toma de fósforo en suelos con bajo contenido del mismo y puede incrementar la disponibilidad de Zn y Cu. La población de hongos Micorizas es menos extensiva cuando los niveles de nutrientes son altos.

Las propiedades que influyen en el crecimiento de la raíz son la compactación del suelo, balance aire-agua, aeración, capacidad de mantenimiento de agua, pH, patógenos y la temperatura.

**La Rizosfera** La rizosfera es la zona inmediatamente adyacente a la raíz de la planta (1-4mm), en esas regiones hay actividad microbial, que se alimenta de los compuestos orgánicos exudados por las raíces. La actividad microbial incrementa la solubilidad de los nutrientes aumentando así la posibilidad para ser absorbidos por las raíces. En los nódulos de las raíces de las legumbres hay bacterias simbiotes que convierten el nitrógeno gaseoso de la atmósfera en formas útiles para ser utilizados por la planta.

### 3.3. Mecanismos de alimentación de agua y nutrientes en la planta

#### 3.3.1. Potencial del agua

El estatus de agua en la planta se mide en términos del potencial de agua, ( $\psi$ ), el cual es una medida de energía libre que puede hacer trabajo. El potencial de agua se define a partir del potencial químico para el agua

$$\mu_W = \mu_W^* - \bar{V}_W \Pi + \bar{V}_W P + m_W gh \quad (3.1)$$

$$\psi = \frac{\mu_W - \mu_W^*}{\bar{V}_W} = \psi_p + \psi_\Pi + \psi_m + \psi_g \quad (3.2)$$

donde  $\mu_W^*$  es el potencial del agua en equilibrio químico,  $\bar{V}_W$  es el volumen molar parcial de agua,  $\psi_p = P$  es el componente *presión* que es la diferencia de presión hidrostática desde una referencia y puede ser positiva o negativa;  $\psi_\Pi = -\Pi$  es el componente *osmótico*;  $\psi_m$  es el

componente *mátrico* que resulta de hidratación coloidal y el fenómeno de capilaridad en los tejidos, pero frecuentemente es incluido en  $\psi_{\Pi}$ ;  $\psi_g = \rho_W g h$  es el componente *gravitacional*.

La *potencial osmótico*  $\Pi = -\psi_{\Pi}$  es una presión causada por la diferencia de concentración de agua entre dos fases separadas por membrana semipermeable. En una fase II hay menos cantidad de agua (solvente- $W$ ) ya que esta mezclada con azúcares (soluto- $s$ ). Se puede demostrar que potencial osmótico está relacionado fracción molar de agua ( $x_W$ ) o a su actividad ( $a_W$ ) en la fase II como:

$$\Pi = \frac{RT}{V_W} \ln(\gamma_W x_W) = \frac{RT}{V_W} \ln a_W \quad (3.3)$$

donde  $\gamma_W$  es un coeficiente de actividad que mide la desviación del comportamiento ideal de la solución. Para muchas soluciones la ec.(3.3) es aproximada por la relación *van't Hooff*

$$\psi_{\Pi} = -RT\Delta c_s \quad (3.4)$$

donde  $\Delta c_s$  es el gradiente de concentración del soluto en ( $\text{mol.m}^{-3}$ ).

### Absorción de agua por una célula de una planta

Una característica de las células de la planta es que ellas están encajonadas en una pared celular rígida que resiste a la expansión, así estas generan una presión interna hidrostática en contra del aumento del volumen de agua dentro de la célula. Los principales componentes de potencial del agua que son relevantes para las células de la planta son el osmótico y el hidrostático.

$$\psi = P + \Pi \quad (3.5)$$

La diferencia de presión entre el interior y el exterior de la pared celular es usualmente positiva y comúnmente llamada *presión de turgencia* ( $P_T$ ) definida como.

$$P_T = (P(o) - P(i)) \quad (3.6)$$

En una célula totalmente turgida (totalmente llena de agua  $\psi = 0$ )  $P = \Pi$ . Como la célula pierde agua el volumen de ella decrece y así la presión de turgor también. Cuando la presión de turgencia se hace cero el marchitamiento de la planta se hace visible. El flujo de agua dentro de la célula y consecuentemente el crecimiento es consecuencia de la fuerza que lo produce y de la conductividad hidráulica en la membrana y también de las propiedades reológicas de la planta. La fuerza que produce el flujo de agua está dada por una diferencia de potencial de agua entre el exterior y el interior de la célula

$$\Delta\psi = \Delta P + \Delta\Pi = (P(o) - P(i)) + (\Pi(o) - \Pi(i)) \quad (3.7)$$

$$\Delta\psi = P_T + \sigma_c\Delta\Pi \quad (3.8)$$

donde  $\sigma_c$  representa un término de permeabilidad de la membrana celular a flujo de agua. Así la densidad de flujo volumétrico de agua ( $J_W$  [ $\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]) esta dada por

$$J_W = L_p(P_T + \sigma_c\Delta\Pi) \quad (3.9)$$

donde  $L_p$  ( $\text{m s}^{-1}\text{Pa}^{-1}$ ) es la conductancia hidráulica de la membrana [2].

### 3.3.2. Disponibilidad de agua y nutrientes en la superficie de raíz

#### Disponibilidad de agua

El flujo de agua del suelo a la superficie de raíz esta dado por la ley de Darcy [2]

$$J_{WS} = -L_{WS}\frac{\partial\psi_{SR}}{\partial x} \quad (3.10)$$

donde  $\partial\psi_{SR}/\partial x$  es el gradiente de potencial del agua entre el suelo y la superficie de raíz,  $L_{WS}$  es coeficiente de transporte de agua en el suelo.

#### Disponibilidad de nutrientes

La disponibilidad de nutrientes en la zona de raíz depende de tres mecanismos: La intercepción de raíz, el flujo de volúmen, y la difusión.

**Intercepción de raíz:** Es un mecanismo de abastecimiento en el cual la superficie de la raíz al crecer intercepta directamente los iones de nutrientes en el suelo, esto depende de la cantidad de nutrientes en el suelo y el volumen de suelo desplazado por el sistema de raíz. Este mecanismo tiene un pequeña, pero importante contribución a los nutrientes que alcanzan la raíz. Y es significativo para nutrientes presentes en altas concentraciones o macronutrientes (ej. Ca, Mg) y nutrientes requeridos en pequeñas cantidades o micronutrientes (ej Zn, Mn ). Los factores que afectan negativamente este mecanismo son un suelo seco, compactación, acido PH bajo del suelo, pobre aeración, enfermedades de la raíz, altas o bajas temperaturas.

**Flujo de volumen:** Es el mecanismo de abastecimiento y transporte, el cual consiste en el acarreo de nutrientes disueltos en el flujo de agua a la raíz de la planta, donde el flujo es accionado por la transpiración (principal factor), evaporación, y filtración, La cantidad de abastecimiento de nutrientes en la raíz depende de la velocidad del flujo, y la concentración de nutrientes. Abastece más de las cantidades requeridas de *nutrientes móviles* ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ , y  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) y frecuentemente Ca, Mg. Puede satisfacer los requerimientos de Cu, Mn, Mo y significativamente una porción de los requerimientos de Fe, Zn. Los factores que afectan este

mecanismo son el contenido de agua en el suelo, baja temperatura (reduce evotranspiración), tamaño del sistema de raíz.

**Difusión:** Mecanismo de abastecimiento y transporte, en el cual iones de nutrientes se difunden hacia la superficie de la raíz bajo un gradiente de concentración. Las raíces al absorber los nutrientes desde del suelo bajan la concentración de estos en la superficie de raíz respecto a resto del "volumen" del suelo. Este mecanismo es importante para nutrientes que interactúan fuertemente con el suelo, principalmente los elementos P y K (considerados nutrientes móviles); y es importante para los micronutrientes especialmente Fe y Zn. Los factores que afectan la difusión los podemos evaluar a través de la primera y segunda Ley de Fick's [2]. De la primera ley tenemos que la razón difusión ( $\frac{dc_i}{dt}$  [mol/s]) o densidad de difusión ( $J_{ni}$  [mol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>]) del i-ésimo ion nutriente esta dada por

$$\frac{dc_i}{dt} = D_{ei} A_{sr} \frac{dc_i}{dx} \quad \text{o} \quad J_i = D_{ei} \frac{dc_i}{dx} \quad (3.11)$$

donde  $\frac{dc_i}{dx}$  es gradiente de concentración en una dimensión,  $D_{ei}$  es el coeficiente de difusión efectivo,  $A_{sr}$  es la área de la superficie de raíz y  $J_i$  es la densidad de flujo del i-ésimo soluto [6,7].

Cuando la concentración de nutrientes además depende de la posición es decir esta distribuida heterogéneamente en el espacio entonces, por conservación de materia tenemos,  $\nabla J_{sr} = -\frac{\partial c_i}{\partial t}$  la cual con la ec. (3.11) resulta en

$$\nabla^2 c_i = \frac{1}{D_{ei}} \frac{\partial c_i}{\partial t} \quad (3.12)$$

Las distancias de difusión en una situación de crecimiento son muy cortas para K-0.2cm y para P-0.02cm. En el abastecimiento por difusión es muy importante el tamaño y la densidad del sistema de raíz. Este mecanismo tiene profundas implicaciones para la aplicación de fertilizantes.

### 3.3.3. Absorción de agua y nutrientes en la raíz

#### Rutas de absorción del agua y nutrientes de la superficie de la raíz a la planta

Los nutrientes y el agua se mueven del suelo al xilema a través de varios tejidos de la raíz (Epidermis-Corteza-Endodermis-Xilema) a través de dos rutas:

La ruta *apoplastica* es extracelular, entre y el interior de las paredes celulares, el flujo va de la epidermis a través de la corteza a la endodermis, donde las rutas para el movimiento del agua en la pared celular, son bloqueadas por una banda de tejidos subelevados (el tiro Casparian). Lo cual asegura que el agua y los nutrientes pasen a través de la membrana celular vía *symplasma*.

La ruta *symplasma* es intracelular, en la cual células separadas forman el *symplasta*, las cuales son conectadas por estrechas conexiones citoplásmicas llamadas plasmodesmas. En este caso el agua y los nutrientes pasan directamente de la endodermis al xilema.

Los nutrientes son absorbidos de manera pasiva vía Apoplasma y de manera activa vía Simplasma, en una forma inorgánica (iones), después de alcanzar la superficie de raíz. La absorción de agua por las raíces esta acoplada con absorción pasiva de nutrientes

**Absorción pasiva de nutrientes y agua** Puede ser vista como acoplamiento entre el flujo de solutos ( $J_N$ ) (iones de nutrientes) y el flujo de volumen ( $J_W$ ) de agua que cruza las membranas de la superficie de raíz, esto debido a una diferencia en el potencial del agua ( $\Delta\mu_W = -\bar{V}_W\Delta\Pi + \bar{V}_W\Delta P$ , con  $\bar{V}_W$  es volúmen parcial del agua) y a una diferencia en el potencial de los solutos ( $\Delta\mu_N = -\frac{1}{c_N}\Delta\Pi + \bar{V}_N\Delta P$ , con  $\bar{V}_N$  el volumen parcial de los solutos y  $c_N$  es la concentración de solutos), entre el interior y exterior de la membrana.

$$\begin{aligned} J_W &= L_{WW}\Delta\mu_W + L_{WN}\Delta\mu_N \\ J_N &= L_{NW}\Delta\mu_W + L_{NN}\Delta\mu_N \end{aligned} \quad (3.13)$$

donde  $L_{WW}$ ,  $L_{WN} = L_{NW}$ , y  $L_{NN}$  son coeficientes transporte. Se puede demostrar que la ec. (3.13) es equivalente:

$$\begin{aligned} J_V &= L_V\Delta P + L_{PD}\Delta\Pi \\ J_D &= L_{DP}\Delta P + L_D\Delta\Pi \end{aligned} \quad (3.14)$$

donde  $J_V = \bar{V}_W J_W + \bar{V}_N J_N$ ,  $J_D = J_N/c_N - J_W \bar{V}_W$  son respectivamente las densidades de flujo de volumen y difusión totales que cruzan la superficie de la raíz. De las relaciones de Onsager se tiene que  $L_{DP} = L_{PD}$ , y si consideramos un acoplamiento estacionario se encuentra que  $\kappa = -L_{DP}/L_P = -L_{PD}/L_P$ . Con lo cual la densidad de flujo de volumen esta dado por:

$$J_V = (\Delta P - \kappa\Delta\Pi) \quad (3.15)$$

y para diferentes solutos se tiene que

$$J_V = (\Delta P - \sum_j \kappa_j \Delta_j \Pi_j) \quad (3.16)$$

y el flujo de solutos esta dado por la

$$J_N = c_N(1 - \kappa)J_V + \omega\Delta\Pi \quad (3.17)$$

donde  $\omega = (L_D - \frac{L_{DP}L_{DP}}{L_P})$

**La toma activa de nutrientes** La toma activa de nutrientes ocurre a través de membranas celulares vía simplasma. En este caso la toma de iones nutrientes es selectiva. Para este proceso se requiere energía ATP (energía libre producida por el proceso de respiración) pues el movimiento de los iones ocurre en contra de un gradiente electroquímico (ya que hay una más alta concentración de iones dentro de la célula que fuera de esta). El transporte de iones a través

de la membrana ocurre por medio de portadores selectivos, los cuales están localizados dentro la membrana. Para mantener la neutralidad eléctrica en las células de la raíz, estas liberan  $H_2$ , si toman un catión, y liberan  $H_2O$ , si toma un anión, la toma de cationes es generalmente mayor que la toma de un anión. En este proceso la fuente de potencia es el ATP sintetizado por una parte del flujo de carbohidratos de las hojas a la raíz [7]. Entonces podemos decir que el flujo activo de nutrientes a través de la membrana celular,  $J_{NA}$ , es proporcional al flujo de savia hacia la raíz,  $J_{SP}$ ,

$$J_{NAi} = \alpha J_{SP} \quad (3.18)$$

con

$$J_{NAi} = -\frac{c_i w_i}{N} \text{grad } \tilde{\mu}_i$$

donde  $c_i$  es la concentración del ión,  $w_i/N$  es su movilidad, y  $\text{grad } \tilde{\mu}_i$  es el gradiente de potencial electroquímico entre el interior y exterior de la membrana [4].

### 3.3.4. Transporte de agua y nutrientes a través del xilema

El transporte de agua y nutrientes a través del xilema es accionado por dos procesos la presión de raíz y el gradiente de presión producido por la transpiración. La presión de raíz es una presión osmótica positiva generada por la acumulación de minerales y azúcares disueltos en el centro de la raíz los cuales disminuyen el potencial del agua en ese sitio. Esto fuerza el flujo de minerales y agua a los conductos. Esta presión es despreciable comparada con la presión generada por la transpiración.

La transpiración de agua en las hojas de la planta produce un gradiente de presión entre las hojas y las raíces que acciona el flujo de agua en la planta a través del xilema. Cuando el agua es evapora por transpiración, una película de agua reviste los estomas reemplazando el espacio de aire dejado por esta. Esta película de agua retrocede dentro de los poros de las paredes celulares, atraída por la adhesión de está hacia las paredes celulares. Al mismo tiempo, fuerzas cohesivas del agua resisten un incremento en el área superficial de la película. La combinación de estas dos fuerzas causan que la superficie de la película de agua forme un menisco cóncavo. Así la película de agua en la superficie de las células de la hoja tiene una presión negativa, una presión menor que la presión atmosférica. Además la cohesión del agua debida a las ligaduras de hidrógeno hace posible tirar una columna de agua desde arriba sin que se separe. Y la adhesión de agua a las paredes de las células del xilema ayuda a contrarrestar el efecto de la gravedad.

#### Flujo de agua y nutrientes en el xilema

El flujo de agua y nutrientes a través del xilema ( $J_{WP}$  [ $m^3/m^2.s$ ]) de la planta, lo podemos ver como un densidad de flujo de volumen a través de un tubo cilíndrico, accionado por gradiente de presión hidrostática. El cual puede ser expresado por la *Ley de Poiseuille's*

$$J_{WP} = -\left(\frac{r^2}{8\eta l}\right) \frac{\partial P}{\partial x} \quad (3.19)$$

donde  $r$  es el radio de los tubos y  $\eta$  es la viscosidad dinámica de fluido (para el agua a 20° C es  $1 \times 10^{-3} \text{Pa s}$ ),  $(\partial P / \partial x)$  es la componente presión del gradiente de potencial del agua, ya que el componente osmótico y mátrico son pequeños en el xilema. La ec.(3.19) solo es valida para condiciones de flujo laminar i.e cuando  $(J_{WP} r / \eta) < 2000$ , esto es apropiado para flujos en sistemas de plantas. La fricción de arrastre en las paredes de un capilar ocasiona un flujo más rápido en el centro. El flujo de agua y minerales en el xilema normalmente es tan rápido como 75cm/s.

### 3.3.5. Evaporación y transpiración

El flujo de vapor de agua planta-atmósfera (transpiración),  $J_{VP}$ , está dado por

$$J_{VP} = g_W \nabla c_W \quad (3.20)$$

donde  $g_W = \frac{1}{r_s} + \frac{1}{r_{cl}}$  es la conductancia de vapor de agua ( $r_s$  resistencia estomatal y  $r_{cl}$  resistencia en la capa límite) y  $\nabla c_W$  es el gradiente de presión de vapor entre la hoja y la atmósfera.

El flujo de vapor de agua suelo-atmósfera (evaporación),  $J_{VS}$ , está dado esta dado por

$$J_{VS} = g_{WS} \nabla c_{WS} \quad (3.21)$$

donde  $g_W$  es la conductancia de vapor de agua,  $\nabla c_{WS}$  es el gradiente de presión de vapor entre el suelo y la atmósfera.

La suma de la transpiración y evaporación forman la evotranspiración real.

$$J_V = J_{VS} + J_{VP} \quad (3.22)$$

En la planta debe haber un compromiso entre la transpiración y la fotosíntesis ya que al aumentar la área superficial de la hoja para tomar  $\text{CO}_2$ , al mismo tiempo incrementa la área superficial para la transpiración del agua, a través de los estomas de la planta. Este compromiso es realizado por los estomas que son extremadamente sensitivos a factores internos fisiológicos y medio ambientales para que operen de tal manera que optimizan el balance entre las pérdidas de agua y la toma de  $\text{CO}_2$ .

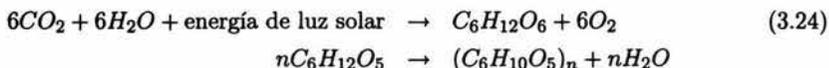
El 90% del agua en las plantas es perdida a través de los estomas y solo se cuenta con el 1% al 2% de esta para realizar la fotosíntesis. Una manera de evaluar la eficiencia de las plantas en el uso del agua es medida por la razón WUE (water-use-efficiency, uso eficiente de agua (UEA) en castellano)

$$WUE = \frac{\text{mol CO}_2 \text{ fijado}}{\text{mol H}_2\text{O} \text{ transpirado}} \quad (3.23)$$

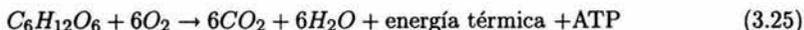
Para muchas plantas esta razón esta alrededor de 1:600, aunque hay plantas como el maíz que absorben  $\text{CO}_2$  atmosférico de otra manera, en las que se tienen razones 1:300 o menos.

### 3.3.6. Fotosíntesis

La fotosíntesis es un proceso en el cual la energía solar (vease subsección 3.3.8) es convertida en energía química a través de una reacción química en los cloroplastos de la planta que forma carbohidratos y  $O_2$  a partir de  $CO_2$  tomado de la atmósfera y  $H_2O$  tomado del suelo. Dicha reacción se expresa de manera simplificada como



Nosotros y todo el reino animal vivimos de este proceso el cual no solo produce alimento si no que también libera oxígeno a la atmósfera que el reino animal necesita para su respiración. En las plantas se da un proceso inverso al de fotosíntesis llamado respiración, en el cual los productos fotosintéticos son reoxidados y descompuestos para producir los constituyentes originales (agua y  $CO_2$ ) y energía libre ATP. La función de la respiración es convertir la energía libre de los carbohidratos en ATP una energía energía libre disponible para poder realizar trabajo biológico, tal como el transporte de aminoácidos, bombeo de sangre, etc. La reacción de respiración se escribe de manera simplificada como



Para cada proceso a escala molecular o global la energía libre disponible disminuye con el tiempo, de ahí la necesidad de un suministro constante de energía libre para realizar trabajo biológico.

De la fotosíntesis tenemos productos orgánicos, los cuales son transformados en formas más solubles, para ser transportados a través de la planta mediante el *floema*.

El mecanismo de transporte se ilustra en la figura 3-1 donde: 1) Los solutos al ser cargados por transporte activo desde la terminal fuente al floema, bajan el potencial del agua y aumentan la presión hidrostática ahí; 2) Por otro lado el flujo de solutos del floema hacia la terminal depósito, aumenta el potencial de agua y baja la presión hidrostática ahí; 3) Entonces la diferencia de presión hidrostática entre las dos terminales produce un flujo savia.

Una parte de esta savia es transportada a la raíz y otra al sistema de brotes de la planta (hojas, tallo, frutos) de acuerdo a la necesidad del órgano de la planta, lo cual depende de la etapa de crecimiento de la planta a este mecanismo se le conoce como "*translocación*". La translocación de savia depende de los gradientes de presión entre la fuente de savia (hojas) y el depósito de savia (raíz, tallo, fruto) lo cual está afectado por los potenciales de agua en distintas partes de la planta.

#### Flujo de savia a través del floema

El flujo de carbohidratos a través del floema ( $J_{SP}[\text{kg}/\text{m}^2.\text{s}]$ ) puede ser expresado por la *Ley de Poiseuille's*

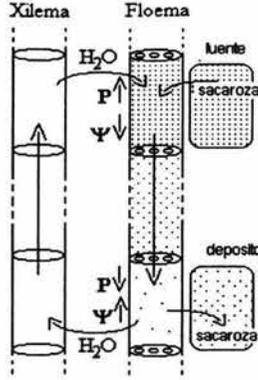


Figura 3-1: Flujo de agua, nutrientes y savia en una planta

$$J_{SP} = -\left(\frac{r_p^2}{8\eta_p l}\right) \frac{\partial P_{SP}}{\partial x} \quad (3.26)$$

donde  $r_p$  es el radio de los tubos del floema y  $\eta_p$  es la viscosidad dinámica de la savia en el floema,  $(\partial P_{SP}/\partial x)$  es el gradiente de presión hidráulica entre la terminal fuente y la terminal depósito del floema.

Dado que las raíces están más cercanas a la fuente de agua mantienen un estado más hidratado, por lo que ellas son más hábiles para mantener la presión de turgencia, así se hacen las preferidas para el depósito de carbohidratos solubles. Cuando las plantas comienzan a tener estrés de agua el alojamiento de savia en el sistema de brotes disminuye mientras, el alojamiento de savia en la raíz aumenta [1].

El patrón de partición de savia entre las raíces y el sistema de brotes, depende de la especie. Por ejemplo, las plantas de regiones áridas desarrollan una cubierta vegetal pequeña y un sistema de raíz profundo, contrario al desarrollo de plantas en ambientes húmedos cuyas raíces son superficiales.

Antes de que la savia se incorpore dentro la nueva estructura material (biomasa) se da el proceso de respiración tanto en el sistema de brotes y raíces, este proceso depende generalmente de la temperatura y la masa de los tejidos respectivos.

### 3.3.7. Flujo de radiación necesaria para la fotosíntesis

Una parte de la radiación neta que llega a la cubierta de la planta se captura por la misma y permite que se realicen reacciones bioquímicas. A la región del espectro que activa estas reacciones se le conoce como PAR (PAR, por sus siglas en inglés Photosintetic Active Region) o en castellano Región Activa Fotosintética (RAF). Y usualmente se define como el ancho de

banda entre 400nm y 700nm. El flujo de radiación,  $J_{hv}$ , se puede expresar como flujo de fotones ( $\text{mol m}^2 \text{ s}^{-1}$ ).

$$J_{hv} = nh\nu/m^2$$

Solo el 50% de la radiación incidente de onda corta esta en la región PAR. Y cerca del 80-85% de la radiación en esta región es absorbida por la planta.

### 3.3.8. Flujo de $\text{CO}_2$ , $\text{O}_2$

El flujo de  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$  entre la planta y su medio ambiente está dado por la primera ley de Fick

$$J_{m_i} = D_i \nabla c_i \quad (3.27)$$

Donde  $J_{m_i}$  es la densidad de flujo de masa de un componente  $i$  ( $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ ),  $D_i$  es coeficiente de difusión ( $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ ),  $\nabla c_i$  es gradiente de concentración de un componente  $i$ . Cuando la concentración además depende de la posición es decir está distribuida heterogeneamente en el espacio por conservación tenemos de materia que

$$\nabla^2 c_i = \frac{1}{D_i} \frac{\partial c_i}{\partial t} \quad (3.28)$$

a esta ecuación se le conoce como la segunda ley de Fick's

El coeficiente de difusión del  $\text{CO}_2$  en aire es de  $0.160 \times 10^{-4} \text{m}^2 \text{ s}^{-1}$  y mientras que el del  $\text{O}_2$  es de  $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

## 3.4. Etapas de crecimiento de un sistema biológico

Todos los organismos biológicos tienen un tiempo de vida finito. De acuerdo al reino, especie, género varia este tiempo de vida. Por ejemplo desde insectos que viven unas cuantas horas hasta plantas que duran siglos.

Según [8] los organismos biológicos en general tienen tres etapas básicas en su vida en cuanto flujos de masa y de energía. Estas etapas son la embrionaria, la juvenil y la adulta ( ver fig (3-2) ). Todas las etapas del desarrollo biológico de un organismo proceden de acuerdo a un conjunto de normas coordinadas genéticamente y por estímulos del ambiente, las cuales inducen cambios fisiológicos. Cada fase toma una cierta porción en el período de vida y tiene su función y su propia forma particular .

### 3.4.1. Etapa Embrionaria

La etapa embrionaria comprende desde la fertilización del organismo hasta el nacimiento del organismo. En las plantas esta etapa corresponde al desarrollo después de sembrar la semilla, que los animales es equivalente al desarrollo del huevo hacia feto. En esta etapa el organismo no es hábil para obtener su propio alimento y por lo tanto su sistema digestivo no es funcional.

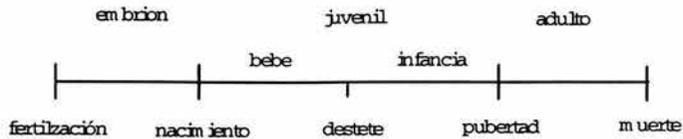


Figura 3-2: Etapas de Crecimiento (reproducida de [8])

Se desarrolla gracias un suministro o depósito de energía. En esta etapa se dá el desarrollo morfológico (crecimiento y la formación de órganos) del organismo.

### 3.4.2. Etapa Juvenil

La etapa juvenil comprende desde el nacimiento o emergencia del organismo hasta la etapa reproductiva. En esta etapa los alimentos son tomados directamente por el organismo, pero los nutrientes no se asignan a procesos reproductivos.

La etapa juvenil esta dividida en dos subetapas:

1. **Bebé.-** Después de nacer o emerger (germinación en plantas) el organismo se sigue desarrollando en cuanto a creación de estructura alcanzando un máximo en la velocidad de desarrollo al pasar de bebé a niño. En mamíferos esta etapa se refiere a la toma de leche de la madre. En realidad un bebe representa un transición entre el paso del embrión al juvenil.
2. **Infancia.-** Durante este período se da una disminución paulatina en la velocidad del desarrollo del organismo hasta alcanzar un valor igual cercano a cero al llegar al pubertad y pasar a ser un adulto fisiológicamente. En plantas esta etapa corresponde al desarrollo vegetativo.

### 3.4.3. Etapa Adulta

La etapa adulta esta comprendida desde la pubertad hasta la muerte, durante esta etapa la energía se asigna a procesos reproductivos, para cumplir el ciclo reproductivo.

La pubertad, representa una transición entre la etapa juvenil y la etapa adulta, esta etapa es corta.

En la etapa adulta hay una etapa posterior la cual es conocida como senil, esta etapa concluye con la muerte.

En la figura (3-3) se muestra curvas experimentales del desarrollo biológico de plantas. En la primera curva se muestra el aumento de la altura de la planta desde el 7° -23° día después de sembrarse. En la segunda curva se muestra la tasa de crecimiento en el mismo periodo de días, la cual muestra un máximo tasa de crecimiento al 15 día que corresponde a la transición entre la etapa de germinación y desarrollo vegetativo.

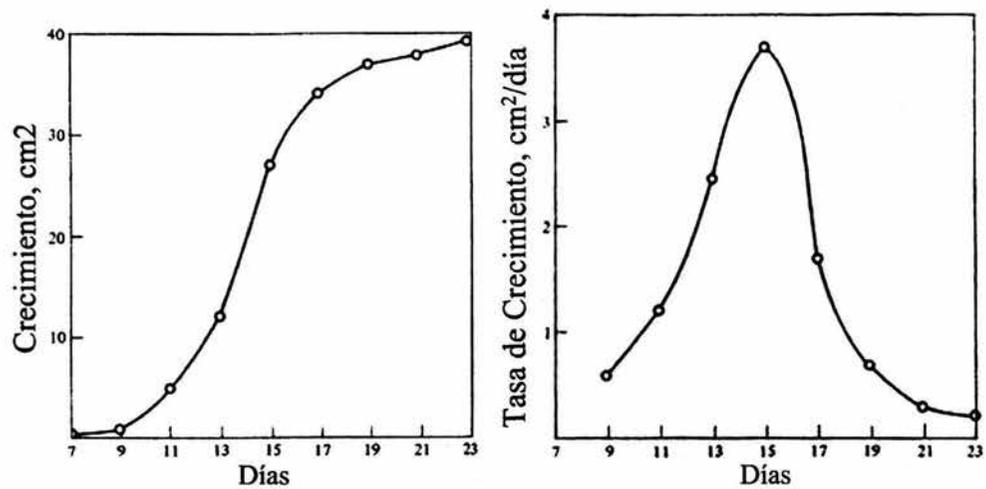


Figura 3-3: Curvas de crecimiento de una planta (Tomadas de [9])

# Bibliografía

- [1] Daniel Hill, *Envioemnetal Soil Physics*, Academic Press, (1998).
- [2] Hamlyn G. Jones, *Plants and microclimate*, Cambridge University Press, (1992).
- [3] Larcher, *Physiology Plant Ecology*, Springer, 3° Ed. (1995).
- [4] Park S. Nobel, *Plant Physiology (Physicochemical & environmental)*, 2° Ed. Academic Press, (1999).
- [5] Roland Glaser, *Biophysics*, Springer, 1° edition, (1996).
- [6] J. Carlos Santamarina en colaboración con K. A. Klein and M. A. Fam, *Soils and Waves*, Jonh Wiley & Sons, Chichester, (2001).
- [7] <http://www.soils.umn.edu/academics/classes/soil3416/lecture3.htm>
- [8] S.A.L.M Koojiman, *Dynamic Energy and Mass Budgets in Biological Systems*, Second Edition, Cambridge, Universty Press, (2000).
- [9] Ting, Irving *Plant Physiology*. Addison-Wesley Pub.(1982)

## Capítulo 4

# Ecosistemas

### 4.1. Introducción

En este capítulo en una primera parte se hace un breve resumen de conceptos clásicos de ecología, sobre ecosistemas y agroecosistemas. En la segunda se trata sobre la definición y propiedades de un ecosistema, la tercera sección trata sobre la definición y propiedades de un agroecosistema. En la cuarta sección se muestra un análisis comparativo de la de los energéticos entre la biosfera y la tecnosfera.

### 4.2. Ecosistemas

#### 4.2.1. Definición

Un ecosistema el cual se mantiene en estado estacionario puede ser definido como un sistema funcional de relaciones complementarias entre organismos vivos y su medio ambiente, delimitado por un frontera. Un ecosistema así tiene una parte física con relaciones particulares -la **estructura del sistema**-que juntamente toman parte en los procesos dinámicos-la **función del sistema**.

Los componentes más básicos estructurales de un ecosistema son los factores **bióticos**, organismos vivos que interactúan con el medio ambiente, y los factores **abióticos**, componentes físicos y químicos del medio ambiente tales como el suelo, luz, humedad, y temperatura.

#### 4.2.2. Niveles de organización de un ecosistema

Los ecosistemas pueden ser examinados en términos de una organización jerárquica de las partes que los componen. El nivel más simple es un **organismo** individual ( fisiología ecológica), el siguiente nivel de organización son grupos de individuos. Tal grupo es conocido como **población** (ecología de poblaciones-útil para el agrónomo en cuanto a la densidad de siembra).

Poblaciones de diferentes especies siempre ocurren en un lugar particular dichas especies interactúan una con otra, creando el siguiente nivel de organización, la **comunidad** (ecología de comunidades-un aspecto importante de este nivel es cómo la distribución de organismos afectan la distribución y abundancia de las diferentes especies que hacen la existencia de un comunidad particular), el último que incluye a todos los demás es el **ecosistema** en sí mismo, que toma en cuenta la interacción entre todos los elementos bióticos y elementos abióticos [1].

Una característica de los ecosistemas es que en cada nivel de organización emergen propiedades que no existen en los niveles más bajos de organización. Estas propiedades emergentes son el resultado de la interacción de las partes y componentes de aquel nivel de organización.

#### 4.2.3. Propiedades estructurales de un ecosistema

Las principales propiedades estructurales de un ecosistema son:

1. **La diversidad de especies**, es el número de especies que están presentes en la comunidad.
2. **Dominancia y abundancia relativa** . Las especies con impacto más grande sobre ambos componentes bióticos y abióticos de la comunidad son referidos como especies dominantes, lo cual no implica necesariamente que sean las más abundantes.
3. **La Estructura vegetativa**. Caracteriza a una comunidad terrestre, por la forma y abundancia de las especies de plantas dominantes que habitan en ellas. Por ejemplo estepas, pastizales, bosques, etc.
4. **La estructura trófica**, surge de las relaciones de alimentación entre especies de una comunidad, y por la necesidad de alimento de estas. Las plantas son fundamentales en la estructura trófica de cada comunidad por su habilidad para capturar energía solar y convertir ésta, a través de la fotosíntesis, en una forma de energía química estructurada en forma de biomasa, lo cual puede servir como alimento para otras especies llamadas **consumidores** de la comunidad, de este rol trófico las plantas son conocidas como **productores** y fisiológicamente las plantas son consideradas como **autótrofos** porque ellas auto-satisfacen sus necesidades de energía libre. Dentro de los consumidores están los **herbívoros** que convierten la biomasa vegetal en biomasa animal, **predadores** y **parásitos** que predan sobre herbívoros y otros predadores. Los consumidores son considerados como **heterótrofos** por que necesitan de otros organismos para satisfacer su necesidad de energía. Cada nivel de consumo define un **nivel trófico**. La cantidad de relaciones tróficas en una comunidad es conocida como cadena alimenticia o red alimenticia. Las relaciones tróficas pueden ser de gran importancia en procesos en agroecosistemas tales como la administración de plagas y enfermedades:
5. **La estabilidad** de una comunidad es la habilidad de ésta para resistir cambios y ser resistentes en respuesta a perturbaciones. La relativa estabilidad de un comunidad depende grandemente del tipo de comunidad y la naturaleza de las perturbaciones a las cuales esté sujeta, dentro los ecologistas aún está en debate si esta propiedad estructural es inherente al sistema.

#### 4.2.4. Dinámica de un ecosistema natural

En un ecosistema ocurren procesos dinámicos tales como, el flujo de materia y de energía, y las interacciones entre los organismos que lo componen.

#### 4.2.5. Flujo de Energía:

En un ecosistema cada organismo individual está constantemente usando energía libre la cual disipa a través de sus procesos fisiológicos, y sus fuentes de esta energía tienen que ser reemplazadas regularmente. El flujo de energía está directamente relacionado con su estructura trófica. Pero para fines de análisis es mejor enfocarse en las fuentes de energía y su movimiento a través de la estructura.

La energía solar en un ecosistema es capturada por las plantas y depositada en compuestos orgánicos en forma de biomasa, los ecosistemas varían en su habilidad para convertir la energía solar en biomasa. La cantidad de energía capturada por un ecosistema puede determinarse por el número de plantas de pie o biomasa de plantas en el sistema.

La **producción primaria bruta** (gross primary productivity GPP) es la razón de conversión de energía solar en biomasa, también se puede medir ( $\text{kcal/m}^2/\text{año}$ ).

La **producción primaria neta** (net primary productivity NPP) es análoga a la GPP, con la diferencia de que la energía que usan las plantas para mantenerse ellas mismas es sustraída de la GPP. ( $\text{kcal/m}^2/\text{año}$ )

Los herbívoros (consumidores primarios) convierten la biomasa vegetal en biomasa animal, y predadores y parásitos continúan (consumidores secundarios y de más altos niveles) con este proceso de conversión entre los niveles tróficos. Solo un pequeño porcentaje de la biomasa en un nivel trófico es convertida al siguiente nivel trófico, esto es por que gran cantidad de energía es gastada en el mantenimiento de los organismos en cada nivel (el 90% de la energía consumida). La biomasa en forma de organismos muertos y materia fecal es retornada en el suelo por **detrívoros y descompositores**. Los procesos de descomposición liberan en forma de calor mucha de la energía y la biomasa residual retornada al suelo como nutrientes.

En ecosistemas naturales, la mayoría de la energía que sale del sistema lo hace en forma de calor, generado en parte por la respiración de los organismos en los varios niveles tróficos y parte por la descomposición de biomasa.

En estado estacionario hay un balance en la energía de entrada y la energía de salida.

#### 4.2.6. Ciclo de Nutrientes:

Los organismos requieren, además de ingreso de energía libre, entradas de materia (variedad de nutrientes: elementos y compuestos) para mantener sus funciones. Los cuales usan para construir células y tejidos.

Los ciclos de nutrientes en un ecosistema están obviamente relacionados a los flujos de energía: la biomasa transferida entre niveles tróficos contiene tanto: materia que sirve como componentes estructurales de muy diverso tipo, la cual tiene energía libre en la forma de enlaces químicos.

La energía solo fluye en dirección del sol a los productores, a los consumidores y al medio ambiente. En contraste los nutrientes se mueven en ciclos entre los componentes abióticos y bióticos de un ecosistema, por lo que son conocidos como **ciclos biogeoquímicos**. Como un todo estos son bastante complejos e interconectados y pueden ocurrir tanto a nivel individual como global.

Los ciclos de nutrientes más importantes a través de un ecosistema son los del carbono (C), oxígeno (O), fósforo (P), azufre (S), nitrógeno (N) y agua. Con excepción del agua, cada uno de estos son conocidos como **macronutrientes**. Cada nutriente tiene una ruta específica a través del ecosistema dependiendo del elemento y la estructura trófica del sistema. Los tres principales ciclos biogeoquímicos son el del carbono, oxígeno y nitrógeno, la función primaria de la atmósfera es la de reservorio. Podemos visualizar que los ciclos tienen un carácter global, por ejemplo el dióxido de carbono dentro del aire respirado por los humanos puede ser tomado por cualquier planta en algún lugar del planeta. Elementos menos móviles como, el fósforo, sulfuro, potasio, calcio y la mayoría de los elementos de traza, tienen ciclos más locales, y el suelo es su principal reservorio abiótico. Estos nutrientes son tomados por las raíces de las plantas, se depositan por un período de tiempo en biomasa, y eventualmente se regresan al suelo dentro en el mismo ecosistema por los descompositores.

#### **Ciclo del carbono**

El carbono es un elemento que está disponible fácilmente para los organismos; tiene gran movilidad entre su forma abiótica atmosférica como dióxido de carbono, y su forma biótica en plantas y animales, en la forma de carbohidratos complejos. El ciclo del carbono en sistemas vivos es muy variable dependiendo de la especie y de que el sistema está vivo o muerto; aun en el humus del suelo la duración del ciclo del carbono depende de la humedad y la temperatura así como de la oxigenación local. En ocasiones regresa al ciclo en la forma de  $\text{CO}_2$  y en ocasiones como gas, carbón mineral o aceites minerales hidrocarburos, (este último caso se da mediante la extracción humana).

#### **Ciclo del Nitrógeno**

El nitrógeno atmosférico  $\text{N}_2$  para ser aprovechado por las plantas tiene que ser convertido a amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), a través de fijación biológica por microorganismos (bacterias y hongos), lo cual hace que el nitrógeno esté disponible para las plantas. Posteriormente es incorporado en la biomasa de las plantas, y este nitrógeno fijado por la estructura puede hacerse parte del reservorio del suelo y eventualmente ser tomado una vez más por las raíces de las plantas como nitrato ( $\text{NO}_3$ ). Cuando su ciclo en suelo, acaba es regresado a su forma gaseosa, o perdido como amono u óxidos gaseosos de nitrógeno, este ciclo es muy activo dentro de un ecosistema.

#### **Ciclo del fósforo**

El fósforo llega a un suelo por el proceso de desgaste natural de las rocas, puede ser tomado por las plantas como fosfato entonces se pierde del suelo para ir a las plantas o puede ser regresado al suelo por excreción ó descomposición. Los fosfatos tienden a filtrarse fuera del ecosistema en mantos acuíferos, a diferencia del ciclo del nitrógeno y carbón. Un problema a resolver es localizar ciclos donde se guarde el fósforo en los ecosistemas.

Además de los macronutrientes un número de otros elementos químicos llamados **micronutrientes** son de gran importancia, para garantizar el crecimiento de las plantas deben estar disponibles en el ecosistema aunque pequeñas cantidades. Ellos incluyen el hierro (Fe), magne-

sio (Mg), manganeso (Mn), cobalto (Co), boro (B), zinc (Zn), molibdeno (Mo).

Biológicamente, los componentes de cada ecosistema son muy importantes para determinar la eficiencia del flujo de nutrientes, de tal manera que sea mínima la cantidad de pérdida y la máxima cantidad de reciclamiento de estos. Así la productividad de un ecosistema de está relacionada a su habilidad para conservar y reciclar nutrientes.

#### 4.2.7. Regulación de poblaciones:

Las poblaciones son dinámicas: Su tamaño y organización cambia en el tiempo. La demografía de cada especie es función del número de especímenes que nacen, y los que mueren, de la razón de incremento de población o decremento y la **capacidad de mantenimiento** del medio ambiente en el que viven. El tamaño de una población en relación con el de otra población está también determinada por la interacción de aquella población con otras poblaciones y con el medio ambiente. Dos aspectos muy importantes en el tamaño de una población son su **tolerancia al medio ambiente o adaptación** y su "habilidad para interactuar con otras especies". Cuando la adaptación al ecosistema de dos especies es muy similar ocurrirá que las fuentes **alimenticias** serán insuficientes para mantener ambas especies y ocurrirá una fuerte competencia por sobrevivir.

Dentro de las asociaciones biológicas algunas especies desarrollan maneras de interactuar unas con otras que puede ser benéfico para varias especies, a este tipo de relaciones entre otras está el **mutualismo**.

En ecosistemas naturales la selección a través del tiempo da como resultado una estructura biológica lo más compleja posible dentro el limite establecido por el medio ambiente, que permite y mantiene la dinámica de población de los organismos.

#### 4.2.8. Desarrollo y evolución de un ecosistema

Análogamente al desarrollo ontológico de un organismo, un ecosistema pasa por los mismos procesos de desarrollo desde la juventud hasta la madurez.

El desarrollo de un comunidad a corto plazo (1000 años o menos) se le conoce como sucesión ecológica y es un proceso activo que lleva consigo cambios tanto en los organismos como el ambiente físico. Por ejemplo cuando se abandona un campo de cultivo, plantas (malezas) y animales oportunistas colonizan el campo por medio de comunidades temporales o pioneras llamadas serales. Gradualmente se desarrollan comunidades más permanentes, hasta que se llega una etapa madura o etapa climax que se encuentra en equilibrio con el clima regional y el substrato y las condiciones hídricas locales [2]. Hay dos tipos de sucesión: **La sucesión primaria y la sucesión secundaria**.

**La sucesión primaria** es la evolución de un ecosistema desde un ambiente prebiótico donde se presentan las condiciones mínimas que hacen posible la evolución de sistema vegetal, estas condiciones mínimas se refieren a la humedad, cantidad de nutrientes en el suelo, entre otras.

En [4] se muestra un modelo sencillo de un sucesión primaria, dado por las siguientes ecuaciones

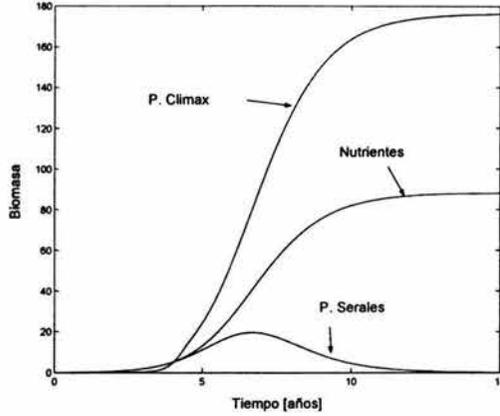


Figura 4-1: Sucesión primaria

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2 & (4.1) \\
 \dot{x}_2 &= x_2 \left( \frac{K_2 - x_2}{K_2} \right) - \frac{x_2 x_3}{K_2} \\
 \dot{x}_3 &= x_1 x_3 \left( \frac{x_1 K_3 - x_3}{x_1 K_3} \right)
 \end{aligned}$$

donde  $x_1$  es la cantidad de nutrientes,  $x_2$  es la cantidad de plantas serales,  $x_3$  es la cantidad de plantas climax (plantas características de un ecosistema en su estado de madurez),  $K_2$  es la capacidad de sostenimiento de las plantas serales,  $\bar{K}_3 = x_1 K_3$  es la capacidad de sostenimiento de las plantas climax.

En la figura 4-1 se ve que inicialmente las plantas serales son dominantes, pero después de un tiempo las plantas climax se hacen dominantes y llegan a su valor máximo en su estado estacionario, un modelo más detallado de una sucesión ecológica se puede encontrar en [3].

La función de las plantas serales es enriquecer el suelo, dándole mayor estructura orgánica permitiéndole guardar más agua, aportando condiciones para el desarrollo de bacterias que ayudan a la fijación de nitrógeno de la atmósfera enriqueciendo aún más el suelo, permitiendo el desarrollo de más plantas, al aumentar la densidad de plantas el suelo disponible sin sombra es pequeño y las pérdidas de energía por evaporación de agua se reducen, logrando un mayor captación de agua y de energía solar lográndola transformación de ésta en biomasa vegetal, a través de proceso fotoquímicos.

La **sucesión secundaria** se utiliza para el desarrollo de comunidades en sitios por una comunidad bien desarrollada o en sitios donde los nutrientes y otras condiciones son favorables

como campos agrícolas abandonados. Esta sucesión es rápida. Las plantas de cultivo son plantas serales ya que existen gracias a la permanencia de la perturbación, ya que se les dan todas las condiciones para que se desarrollen óptimamente, se les fertiliza, se les poda, se les mantiene solas, se evita que existan malezas que compitan por los nutrientes, entre otras cosas son riego, protección, etc.

Un sistema agrícola está en una dinámica de **sucesión retrógrada** ya que a largo del tiempo la biomasa total va disminuyendo a pesar del suministro de fertilizantes debido al poco reciclaje de nutrientes, que trae como consecuencia pérdida de micronutrientes. Cuando se dejan de aplicar los fertilizantes las plantas de cultivo subsisten en decrecimiento tendencial por un tiempo, mientras los fertilizantes acumulados en el suelo decrecen. Pero a la vez que la biomasa de las plantas de cultivo disminuye, otro tipo de plantas se van desarrollando, después de ciertos periodos, la planta de cultivo puede desaparecer o estar permanentemente en estado silvestre junto con otras plantas, y eventualmente se llega a un estado de biomasa máxima por del hecho de que cada año no exista una salida de biomasa del sistema por cosecha) [5].

### 4.3. Agroecosistemas

#### 4.3.1. Definición

Un agroecosistema es un sistema ecológico modificado por la existencia humana para producir alimentos, fibra, u otros productos agrícolas. Un agroecosistema tiene el objetivo de incrementar el valor social de la producción agrícola, el cual está en función de la cantidad de bienes y servicios producidos por el agroecosistema y su relación con las necesidades humanas [7].

#### 4.3.2. Organización

Los cuatro niveles de organización que se aplican para un ecosistema, pueden ser los mismos agroecosistemas. Una planta individual de cosecha-**organismo**, un monocultivo de una planta de cosecha-**población**, un policultivo de plantas con otros organismos-**comunidad** ( un cultivo junto con las hierbas y roedores forman una comunidad), una granja en el contexto de su vertiente-**ecosistema**. En el contexto de propiedades emergentes una granja es más grande que la suma de sus cultivos individuales.

#### 4.3.3. Flujos de energía

Los flujos de energía dentro de un agroecosistema se ven muy alterados por la interferencia humana. La entradas de energía provenientes de fuentes humanas en general no son auto-sustentables a nivel local. Un agroecosistema se hace abierto cuando una cantidad considerable de energía o de la producción vegetal es extraída directamente del sistema en cada cosecha; en lugar de depositarla en forma de biomasa, la cual podría acumularse dentro del sistema, dando

lugar a un sistema aproximadamente cerrado excepto por salidas e ingreso de materia vía el viento, arrastre por agua o mermas por insectos y animales herbívoros.

#### 4.3.4. Ciclo de nutrientes

El reciclamiento de nutrientes es mínimo en la mayoría de los agroecosistemas ya que cantidades de ellos se pierden dentro del sistema con la cosecha y la erosión debida a la reducción de capa vegetal en el agroecosistema.

#### 4.3.5. Mecanismos de Regulación de Población

Debido a la simplificación del medio ambiente y a la reducción en las interacciones tróficas, la población de plantas de cosechas o animales en agroecosistemas son raramente autorreproductores o auto-regulables. El peligro de ataques catastróficos de plagas o enfermedades es más alto a pesar de la interferencia humana para que ello no ocurra.

#### 4.3.6. Estabilidad

Debido a su reducida diversidad estructural y funcional en relación a los ecosistemas naturales, los agroecosistemas tienen mucho menos resiliencia que los ecosistemas naturales. Las diferencias clave ecológicas entre un ecosistema natural y agroecosistema se resumen en la siguiente tabla

	Ecosistema natural	Agroecosistema
Productividad neta	Media	Alta
Interacciones tróficas	Compleja	Simple, lineal
Diversidad de especies	Alta	Baja
Diversidad genética	Alta	Baja
Ciclo de nutrientes	Cerrado	Abierto
Estabilidad(resiliencia)	Alta	Baja
Control humano	Independiente	Dependiente
Permanencia temporal	Larga	Corta
Heterogeneidad del habitat	Complejo	Simple

#### 4.3.7. Fronteras

Las fronteras de un ecosistema pueden escogerse arbitrariamente, en términos prácticos de análisis tenemos que distinguir lo que es externo a un ecosistema y lo que es interno. La distinción se hace necesaria también cuando analizamos las entradas de un agroecosistema.

Las entradas a los agroecosistemas pueden ser de dos tipos: humanas y naturales. Las entradas humanas externas, se pueden dividir en materia (fertilizantes, pesticidas), energía (combustibles para tractores y para bombeo de agua) y materiales (maquinaria, sistemas de irrigación). Por otro lado hay entradas naturales como la radiación solar, precipitación, viento, sedimentos depositados por diversas fuentes en el suelo.

#### 4.3.8. Sustentabilidad de un agroecosistema.

Los flujos pueden ser diseñados para lograr que los agroecosistemas dependan menos de fuentes no renovables de energía y se tenga un mejor balance entre la energía usada para mantener los procesos internos del sistema y aquella que debe estar disponible para exportarse como bienes de cosecha. Los granjeros deben tratar de mantener y desarrollar ciclos de nutrientes lo más cerrado como les sea posible. La regulación de la población es importante para el control de plagas; lo ideal es mantener una gran diversidad del agroecosistema de tal manera que los enemigos naturales del cultivo tenga sus antagonistas que ayuden a guardar un equilibrio entre poblaciones con el máximo de producción (llamados bienes de cosecha). Un agroecosistema que incorpora la calidad de un ecosistema natural, estabilidad, productividad, y balance puede asegurar su equilibrio dinámico para establecer un base ecológica sustentable.

### 4.4. Energéticos, Biosfera y Tecnosfera

La biosfera (parte de la tierra que soporta la vida incluyendo cada organismo vivo dentro de esta ) es un sistema termodinámico abierto con un flujo permante de energía solar. La tierra recibe  $1.2 \times 10^{22}$  kcal de energía solar por año ( lo cual mantiene la máquina climatica). La vegetación terrestre y *fitoplancton* en los océanos son los principales concentradores y transformadores de energía solar en la biosfera, pero esta usa solamente  $2.5 \times 10^{20}$  kcal/año. La cual resulta en  $1.3 \times 10^{18}$  kcal /año de nueva biomasa, de la cual cerca del 70 % es biomasa vegetal. Aproximadamente el 60 % de esta es utilizada en la respiración y el 40 % restante es la producción anual global (producción primaria neta de la *biosfera*) la cual es igual ( $5.4 \times 10^{17}$  kcal/año).La eficiencia del componente *autotrófico* de la biosfera es igual a

$$\eta_F = 5,4 \times 10^{17} / 2,5 \times 10^{20} \approx 0,2\%$$

entonces la estabilidad de la biosfera es mantenida por la continua disipación de energía. En otras palabras la biosfera es un sistema disipativo típico. Este flujo de energía mantiene el estado estacionario de  $1.84 \times 10^{18}$ g (  $8.3 \times 10^{18}$  kcal) , de biomasa viva, donde la biomasa animal es solo 0.8% de esta cantidad. Solamente el 3% de la producción anual neta ( $1.75 \times 10^{16}$  kcal/año) de plantas es consumida por animales-*heterotrofos*. Este flujo de energía el metabolismo de la materia viva y su diversidad.

En la actualidad la *tecnosfera* de la tierra (civilización tecnológica) gasta cerca de  $6.9 \times 10^{16}$  kcal/año (energía fósil, energía nuclear y menor cantida energía hidraulica y energía de carbon de medara ) para su funcionamiento y evolución.

Obviamente, los humanos somos componentes tanto de la biosfera como la tecnosfera.

Si consideramos a los humanos como animales, todos sus requerimientos energéticos son satisfechos a través de alimentos y la demanda de energía anual por cada individuo es  $10^9$  kcal . Para la actual población aproximadamente de  $6 \times 10^9$  individuos, la demanda de anual energía (a través de alimentos ) es de  $6 \times 10^{15}$  kcal/año. Lo cual es aproximadamente 1/3 parte de energía total de la biosfera para animales. A comparación de 0.023% que necesitaban en el neolítico con una población de  $4 \times 10^6$  individuos con lo cual requerían  $4 \times 10^{12}$  kcal/año (veáse figura 4-2). Hasta antes de la aparición de la tecnosfera ( Siglo XVIII) el humano era solo parte de la biosfera.

#### 4.4.1. Balance dinámico Humanidad-Naturaleza

La producción primaria de la biosfera es ( $5.4 \times 10^{17}$  kcal/año), es el flujo de energía que soporta la biodiversidad de biológica. El flujo de energía usado por la tecnosfera ( $6.9 \times 10^{16}$  kcal/año) es cerca del 10% de la producción primaria total de la biosfera. La conclusión es: En la actualidad la biosfera y la humanidad estan en un estado de fuerte competencia por fuentes comunes tales como el suelo y el agua continental. Y puesto que la biosfera debiera estar en equilibrio dinámico (estado estacionario), los flujos entróficos deben que ser balanceados. Puesto la biosfera ( considerada como un sistema termodinámico) esta en estado estacionario, entonces todos los flujos de entropía tienen que ser balanceados. Por consiguiente, el exceso de entropía que es producido por la tecnosfera tiene que ser compensado por medio de dos procesos: 1) Degradación de la biosfera, 2) Cambio en el clima de la Tierra ( en particular incremento promedio de la temperatura de la Tierra) [8]. En la figura 4-2 se muestra la demanda anual de energía a través de alimentos en distintas épocas de la humanidad. Esto actualmente ocurre a costa de dos procesos, degradación de la biosfera y cambio climático de la tierra (en especial aumento de la temperatura global media). La contaminación del medio ambiente y la reducción de la biodiversidad son consecuencias de esta competencia, del hecho de que globalmente la humanidad se resiste a comprender que forma parte de la biosfera y que debe tender a llegar a un equilibrio dinámico con el resto de las especies que forman el ecosistema global llamado Tierra so pena de ser condenados por su propia conducta a la extinción.

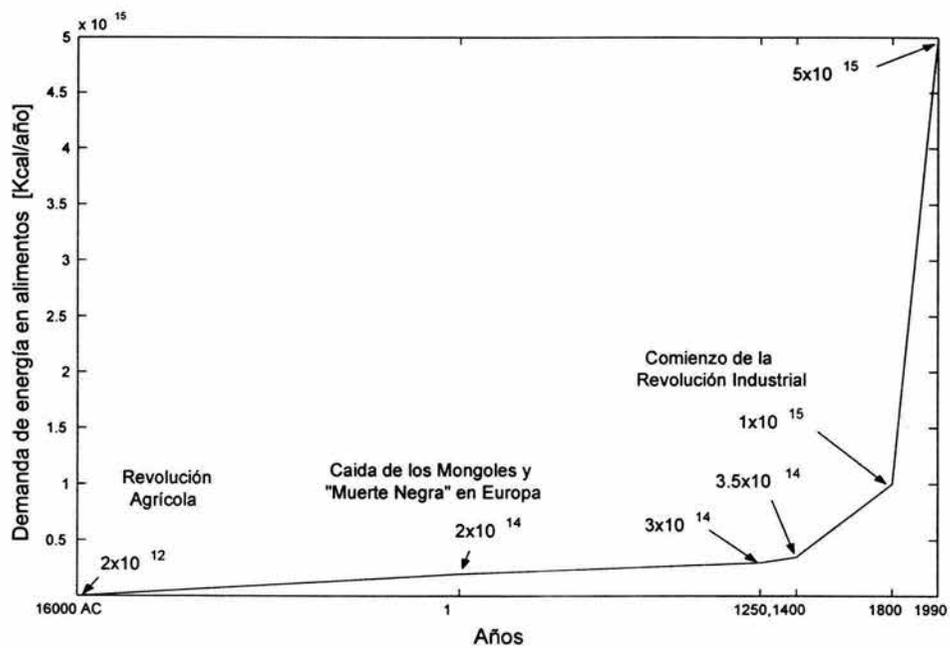


Figura 4-2: Demanda de energía en forma de alimento por parte de la humanidad a través de su historia.

# Bibliografía

- [1] Stephen R. Gliessman , Eric Engles y Robin Krieger, *Agroecology: Ecological Processes in Sustainable Agriculture*, (1997).
- [2] E. Odum, *Ecologia (Peligra la vida)*, Interamericana, MacGraw-Hill, 2° Ed. (1995) .
- [3] Luis T. Guiterres y Willara R. Fey, *Ecosystem Successión*, The MIT PRES, (1980).
- [4] Jonathan Ronghgarden, *PRIMER OF ECOLOGYCAL THEORY*, Prentice Hall, Upper Saddle river, New Jersey 07458. (1998).
- [5] Gorshkov, Victor G, *Biotic Regulation of Enviroment Key Issue of Global Change*. Springer, (2000).
- [6] Howard T. Odum, *System Ecology (An introduction)*, Jonh Wiley & Sons, (1983).
- [7] Conway, *The Properties of Agroecosystems*, Agricultural Systems 24 (1987) 95-117.
- [8] Yu.M Svirezhev and A Svirejeva-Hopkins, *Sustentable Biosphere: critical overview of basic concept of sustainability*, Ecological Modelling 106 (1998) 47-61.

## Capítulo 5

# Revisión de la literatura sobre modelos y análisis energéticos de ecosistemas, agroecosistemas, y estructuras biológicas disipativas.

### 5.1. Introducción

En este capítulo se realiza un revisión de la literatura existente acerca de modelos, y análisis energéticos sobre ecosistemas, agroecosistemas, y estructuras biológicamente disipativas. Nos enfocaremos principalmente a modelos y análisis cuyo marco teórico este relacionado con la termodinámica de procesos irreversibles. En la segunda sección se hace un revisión sobre ecosistemas, en la tercera sección se hace revisión sobre agroecosistemas, y la última sección se hace un revisión sobre estructuras biológicas disipativas.

### 5.2. Modelos y análisis de ecosistemas

Los biólogos introdujeron la ecología como una rama de la biología para entender la interacción entre elementos bióticos y abióticos en la Tierra. Actualmente existen muchos modelos teóricos sobre ecosistemas cuyas herramientas son matemática y biológica las cuales describen bastante bien algunos fenómenos que ocurren dentro de estos tales como: el crecimiento de una población, la competencia intra e inter de las especies que lo forman, las cadenas tróficas, el mecanismo de selección natural, etc. Excelentes libros respecto a esto son [1-4]. Por otro lado

hay modelos que se basan más en leyes físicas: balances de energía y materia. H. T. Odum y otros [5-7] utilizan conceptos de la teoría de circuitos eléctricos (fuente, depósito, disipador). Dentro de estos modelos está el modelo desarrollado en [8], muy detallado de un ecosistema ya que toma en cuenta todo los procesos bioquímicos que ocurren dentro de un ecosistema.

No obstante nosotros estamos interesados en acercamientos basados en termodinámica de procesos fuera de equilibrio que expliquen el desarrollo de un ecosistema. La termodinámica de procesos irreversibles es atractiva desde el punto de vista que trata con sistemas abiertos macroscópicos, con muchos componentes interactuando, como es el caso de un ecosistema.

Boltzman en (1886) reconoció la aparente contradicción entre la muerte calórica del universo (aumento total de la entropía del universo) y la existencia de sistemas vivos en la Tierra los cuales crecían en orden y complejidad. Y fue Schrödinger [9] en (1944) que en su libro "What is Life" quien resolvió esta aparente paradoja, al notar que la vida esta comprendida de dos procesos: 1) **Orden de desorden.**-Notó que los sistemas vivos obtienen fuentes de baja entropía (flujo de entropía negativa proporcionada por la radiación solar) para incrementar su orden, pero a la vez desechan alta entropía hacia su medio ambiente, producto de sus actividades metabólicas, es decir incrementan su orden interno a costa del incremento del desorden total del universo; 2) **Orden de orden.**- Se refiere al hecho de que los sistemas biológicos en sus genes (DNA) guardan información que les permite construir estructura de cierta forma y que esta opere de manera adecuada.

Esto no fue clarificado completamente hasta que la escuela de Termodinámica de Théophile DeDoner y la escuela Bruselas, incursionó en el estudio de los sistemas abiertos intercambiando energía y materia con su medio ambiente, lo cual llevó al desarrollo de la termodinámica de procesos irreversibles, de la cual I. Prigogine fue principal precursor [10]. Con el establecimiento de un marco teórico para estudiar sistemas abiertos Prigogine [11] formuló el "**Principio de mínima producción de entropía**" (ver ec. (2.46)) para estados estacionarios cerca del equilibrio (sistemas lineales) y estableció que para estos sistemas el criterio de evolución era que la rapidez de producción de entropía tendía a un mínimo.

Más tarde junto con Glansdorff estableció un criterio de evolución general para sistemas lejos del equilibrio, conocido como "**Principio Glansdorff-Prigogine**" (ver ec. (2.51)), el cual afirma que la rapidez de producción de entropía debida a los cambios en las fuerzas generalizadas del sistema alcanza un estado estacionario, donde la rapidez de producción de entropía es constante, pero no necesariamente mínima. En general se dice que al estado que llega es metaestable [12].

Y este es el principio que rige la evolución de las estructuras disipativas, las cuales son sistemas lejos del equilibrio, altamente ordenados a través de fluctuaciones para disipar más eficientemente la potencia externa suministrada al sistema. Las estructuras disipativas están caracterizadas por la creación de patrones espacio-temporales. Fenómenos bien conocidos de este tipo, son los patrones especiales de nubes, las corrientes convectivas de viento en la atmósfera, los huracanes, las celdas de Benard, las reacciones autocatalíticas (disipación eficiente de gradientes químicos). etc. Reciben el nombre de estructuras disipativas puesto que la creación y mantenimiento de orden de un sistema lejos del equilibrio ocurre a través de procesos disipativos.

La pérdida de estabilidad de un sistema lejos del equilibrio puede ser explicada usando la teoría general de estabilidad de ecuaciones no lineales diferenciables. Donde se presentan

relaciones básicas entre pérdida de estabilidad y multiplicidad de soluciones y simetría. También se presenta el fenómeno de bifurcaciones.

Otro ejemplo importante de estructura disipativa espacial estacionaria, fue la propuesta de Turing en 1955 para la emergencia morfológica durante el desarrollo embrionario, que estaba basada sobre proceso de reacciones químicas y difusión que trabajan acoplados para producir patrones estacionarios de concentración.

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = D_i \nabla^2 x_i + V_i(\{x_j\}) \quad (5.1)$$

donde  $x_i$  es el  $i$ -ésimo componente,  $D_i$  es el coeficiente de difusión del  $i$ -ésimo componente,  $\nabla^2 x_i$  es el gradiente cuadrático del  $i$ -ésimo componente,  $V_i(\{x_j\})$  es la cinética química del  $i$ -ésimo componente en la  $j$ -ésima reacción. Llegando a la conclusión de que un proceso de difusión con reacciones químicas lejos del equilibrio, en lugar de homogeneizar al sistema como sucede en sistemas cerca del equilibrio aumenta las inhomogeneidades dentro del sistema, creando un patrón espacio temporal [10,14].

Prigogine [10] también notó que aunque es costumbre asociar el orden biológico con la formación de estructuras tales como macromoléculas, células, como un todo, igualmente importante es el **orden funcional**, el cual en una célula real es asegurado por el gran número de rutas bioquímicas acopladas.

Más tarde Prigogine junto con Nicolis [12,13] aportan un explicación termodinámica de la evolución, en la cual la evolución prebiótica es ejemplificada a través de reacciones autocatalíticas de polímeros. Pero también abordan el problema de la evolución como un problema de inestabilidad, causado por las mutaciones o errores de copia en cada generación. En donde la cinética de un sistema básicamente está descrita bajo por dos términos, uno asociado a su interacción con su medio ambiente (intercambio de energía y materia) y otro asociado los proceso internos que ocurren dentro el sistema (reacciones químicas). Tales mutaciones o errores hacen que el estado estacionario actual del sistema se vuelva inestable y adicionalmente evolucione a un nuevo estado estacionario aun más alejado del equilibrio. Lo cual se supone que pasa en cada ciclo evolutivo [12].

Nicolis [12] dice que para describir la evolución de un ecosistema hay que tomar en cuanto los procesos que ocurren dentro del sistema; y los procesos de interacción entre el sistema y su medio ambiente. Los principales procesos que ocurren dentro de un ecosistema son básicamente cuatro: 1) Procesos genéticos, tales como la mutación, tiempo de vida, etc; 2) Procesos de competencia intra e inter específica entre los elementos del ecosistema por la limitada cantidad de recursos dentro de éste; 3) Procesos de regulación debidos a los lazos de retroalimentación dentro del sistema; 4) Procesos de comunicación tales como dispersión, feromonas, etc.

Finalmente concluye que, conforme el material genético tenga más plasticidad el sistema evoluciona a una hacia formas más eficientes de consumir las fuentes medio ambientales. Por lo tanto la selección natural de un sistema biológico depende de su capacidad para degradar las fuentes de energía libre biológicamente aprovechables[12]. Además menciona que un ecosistema se puede considerar en un estado meta estable cuyo umbral de meta estabilidad depende de una manera complicada de los parámetros del sistema y las condiciones externas.

Lotka [20] notó que los ecosistemas evolucionan a un estado en el que se maximizan los flujos

internos del sistema; esa idea fue formulada por Odum (1955) como sigue : La energía disponible es degradada a la máxima velocidad posible, produciendo la máxima potencia ("Principio de máxima Potencia").

Ulanowicks [15,16] retoma el trabajo desarrollado por Prigogine, y establece un método directo para calcular la producción de entropía de un ecosistema, además de que nota que la temperatura de la superficie de un ecosistema es baja, lo cual solo se explica por una creciente rapidez de producción de entropía. Esta tendencia de incremento en la producción de entropía y su madurez fue interpretada por Ulanowicz op cit. como una tendencia hacia la autoorganización, lo cual puede ser cuantificada por el uso del concepto de **ascendencia**.

Jorguensen and Mejer [17] propusieron que los ecosistemas evolucionan hacia un máximo contenido de exergía (energía libre) (**Principio de máxima exergía**).

Mickulecky [18] introduce la idea de modelar sistemas complejos, en especial sistemas vivos no lineales, a través de redes termodinámicas. Este trabajo se basa sobre teoría circuitos no lineales, pero su interpretación física es pobre.

Lovelock and Margulis [21] trabajan sobre la noción de que la composición atmosférica de la Tierra se encuentra lejos del equilibrio químico. Donde este desequilibrio químico esta directamente relacionado con el proceso biótico de la fotosíntesis que libera oxígeno por remover bióxido de carbono de la atmósfera. Formularon la controversial hipótesis de Gaia [21] en su trabajo "Atmospheric homeostasis by and for biosphere: The Gaia Hypothesis", que postula que la biosfera regula el medio ambiente físico, manteniendo los climas de la tierra estables y favorables para la vida.

Asociada con la hipótesis Gaia op cit. está la noción de que las retroalimentaciones bióticas son principalmente negativas en la naturaleza ( lo cual es necesario para mantener la homeostasis) [19]. Su modelo tuvo fuertes críticas por que está en contra de la selección natural. Para tratar de apoyar su hipótesis en [22] presentó un modelo matemático conocido como la metáfora **Daisyworld**. El cual modela la dinámica de margaritas y su interacción con el medio ambiente descrito mediante ecuaciones fundamentales de la teoría de ecología de poblaciones y física. **Daisyworld** es un modelo muy sencillo con sólo dos tipos de plantas, margaritas de color blanco y oscuro, en un medio que gira alrededor de sol como el del sistema solar, está muy caliente. El cual muestra que cuando el sol era más joven y frío está cubierto de margaritas oscuras que, al absorber su luz, consiguieron que el planeta elevara su temperatura por encima de la que habría tenido sin esos organismos. A medida que éste se calentaba, aparecían las margaritas claras y el reflejo de la luz solar iba enfriando el planeta manteniendo la temperatura a un nivel óptimo. Este modelo ideal demuestra como la regulación puede surgir sin selección natural.

Luigi Sertori [23] define a un **ecosistema global físico** como un sistema que satisface tres propiedades fundamentales: es cerrado respecto a masa (no esta en construcción ni destrucción), abierto respecto a energía y está en un estado estacionario global (la integral de superficie de flujo de radiación ingresando es igual a la integral de superficie de la radiación que sale). Para evaluar un ecosistema considera que deben ser evaluadas dinámicamente, otras tres propiedades: 1) eficacia; 2) estabilidad; 3) contenido de información. Menciona que los ecosistemas locales son finitos en el tiempo por que ellos dependen de reservorios externos. Él calcula el tiempo de vida de un ecosistema local en términos del tamaño del reservorio. Para un caso en la que

la razón de consumo de la energía es constante y el organismo no prolifera, encuentra que el tiempo de vida del ecosistema es directamente proporcional al suministro inicial de energía del reservorio e inversamente proporcional a la razón constante de consumo. Para el caso de libre proliferación o patrón colectivo de consumo de energía llega a la conclusión de que la energía suministrada crece exponencialmente en el tiempo de vida. Es decir a un fijo suministro de energía la sociedad proliferando tiene una corta vida. Menciona que aparentemente la naturaleza a escogido durabilidad e hizo esto vía alimentación mutua, o diferenciación presa-predador. Donde la razón de consumo para un ecosistema con dos especies se vuelve periódico, y por lo tanto el tiempo de vida permanece lineal respecto al suministro inicial de energía. Sin embargo para ecosistemas globales no hay reservorios, ni desechaderos. Su libro esta enfocado al análisis de ecosistema tierra, los flujos de radiación, su composición, su eficacia. Nota que los ecosistemas biológicos, los cuales incluyen al hombre, interactúan con ecosistemas térmicos. Los ciclos biológicos no son solo alimentados por simples ciclos térmicos, sino también ellos dependen de complicados ciclos químicos. Hace un análisis del calentamiento global de la Tierra, enunciando que la naturaleza desarrolló super sofisticados ciclos químicos y el hombre se ha comportado en ignorancia de ellos, violando el estado estacionario global.

Kay en [24] a través de la teoría de sistemas complejos llega a la conclusión que hay cuatro tipos de respuesta de un ecosistema a un cambio medio ambiental: 1) El sistema cambia temporalmente pero eventualmente mantiene su estructura; 2) El sistema opera a un nivel diferente usando la misma estructura (aumento o disminución en el población de una especie); 3) Emergencia de una estructura (surguimiento de nuevas especies); 4) Surgimiento de un nuevo estructura disipativa bastante diferente. Introduce el concepto de **integridad** para medir la habilidad de ecosistema para absorber cambios medio ambientales sin cambios en el ecosistema. Observa que la respuesta de un ecosistema a cambio medio ambiental es dependiente de su historia pasada y no sólo de situación presente.

Más tarde Sheiner and Kay [25-27] en analogía con fenómenos como la celda de Benard, sugiere que los ecosistemas alcanzan estados de máxima disipación destruyendo los gradientes de exergía a la máxima velocidad posible. "**Principio de máxima degradación de exergía**"

También menciona que aquellas especies que son más hábiles para incluir energía en su ciclo, son las más aptas para sobrevivir ya que ayudan al ecosistema a degradar más eficientemente la energía libre disponible y eventualmente llevarlo a un estado más alejado del equilibrio.

Kay [26][27] también está convencido de que las técnicas tradicionales de modelado para predecir el comportamiento de un ecosistema no son correctas por lo complicado de estos y sugiere que es mejor analizar a los ecosistemas, a un nivel narrativo basado en principios físicos como la termoninámica de procesos fuera de equilibrio y teoría de **sistemas complejos**. Y inclusive define a un ecosistema como un sistema (SOHO por sus siglas en ingles Self-Organization Holarquic Open <sup>1</sup>). Holarquico se refiere a que un ecosistema tiene una estructura jerárquica. Gunther [28] también a nivel también narrativo retoma gran parte del trabajo de Kay, *op. cit.* y concluye que el anidamiento de sistemas lejos del equilibrio termodinámico es debido a que estos prevén la acumulación de productos de baja-exergía necesariamente excretados por los sistemas autoorganizados. Donde tales productos son usados en ciclos regenerativos del super-

---

<sup>1</sup>En castellano Autoorganización jerárquica abierta (ASA)

sistema.

Stanh [29] nota que la estabilidad de sistemas abiertos a largo plazo como los que trata la ecología, la economía, y la ingeniería, que operan en proceso cíclicos o en estado estacionario depende de su habilidad para exportar su exceso de entropía. Concluye que un proceso entre más eficiente produce menos entropía como le sea posible. Lo que lo lleva a definir la eficiencia entrópica de un sistema como:

$$\varepsilon = \text{producción de entropía "útil"/producción total de entropía} \quad (5.2)$$

donde la producción de entropía "útil" se entiende como la parte de la producción total de entropía la cual es directamente e inseparable conectada al uso pensado del sistema. Ejemplifica que las plantas por ejemplo exportan su exceso de entropía a través de la transpiración lo cual requiere un gasto de energía, así si su exceso de entropía fuera menor necesitarían menos energía para transpiración por lo tanto serían más eficientes.

Jorguensen [30-33] realiza un trabajo extenso, bastante descriptivo sobre un ecosistema, desde un punto de vista termodinámico de procesos fuera de equilibrio, no totalmente riguroso matemáticamente. El ve a un ecosistema como un sistema termodinámico abierto. En el cual hay un flujo de energía libre (exergía) hacia el ecosistema. Y una parte de la exergía es acumulada en el sistema en forma de biomasa e información (que se refiere al aumento de diversidad o complejidad) y otra parte es degradada y desechada hacia el medio ambiente. Menciona que el sistema disipa energía a través de procesos como la respiración, la exudación, la secreción, la mortalidad, que causa ciclos de materia y energía que además dan lugares a redes alimenticias dentro del ecosistema. Considera que la evolución de un ecosistema básicamente consiste de tres etapas sucesivas: 1) depósito de biomasa; 2) aumento de los flujos internos del sistema; 3) aumento en la organización interna del sistema. Donde la dirección que toma la evolución es en la cual el sistema maximiza la acumulación de exergía dentro del sistema en forma de biomasa e información. Lo cual se traduce en un aumento en la degradación de fuentes exergéticas que son expulsadas al medio ambiente, o lo que lo mismo un aumento en la producción de entropía.

Nielsen [34] trabajó sobre la línea de unificar el enfoque de termodinámico de un ecosistema con el acercamiento de redes. El menciona que un ecosistema esta formado por subsistemas de elementos bióticos los cuales forman una red compleja. Cada subsistema requiere exergía, almacena exergía en su estructura, disipa exergía a través de sus procesos metabólicos y exporta exergía a sus subsistemas vecinos formando un compleja red de flujos de exergía.

Más tarde Nielse y Ulanowicks [35] bajo la suposición de que un sistema biológico se desarrolla en la dirección del incremento de la eficiencia termodinámica, llega a la conclusión de que la maximización de eficiencia puede implicar que las entradas del exterior pueden ser maximizadas, los flujos internos son maximizados, el mantenimiento de la estructura puede ser minimizado, y las importaciones de cosecha pueden ser más fácilmente accesibles. Finalmente concluye que aquellos cambios en los flujos patrones que aumentan la **ascendencia**, también contribuyen a aumentar la eficiencia termodinámica.

Bhavik [36] unifica el análisis tradicional de desempeño medio ambiental y de sustentabilidad de un proceso industrial, que toma solo en cuenta el impacto de la emisiones; y el análisis de sistemas ecológicos que toma en cuenta las entradas ecológicas pero ignora el impacto de las

emisiones industriales. Parte de la base de que el crecimiento y mantenimiento de los procesos industriales y ecológicos están limitados por la energía disponible y su conversión en trabajo útil. Así la energía embebida (**emergía**), que es la energía usada directamente o indirectamente para hacer un producto o servicio es un medida termodinámica de inversión ecológica o costo, mientras la pérdida de exergía proporciona un manera holística del impacto de la emisiones.

Recientemente Sverizhev [37-40] motivado por el análisis de sustentabilidad de la biosfera desde una perspectiva teórica, desarrolló un modelo termodinámico de un ecosistema y agroecosistema para evaluar la sustentabilidad de estos, llegando a la conclusión de la sustentabilidad de un agroecosistema el cual puede ser evaluado en términos de la sobreproducción de entropía debido a los proceso irreversibles que ocurren en el interior de este. Considera que un sistema no puede existir por largo tiempo si su producción de entropía es más grande que lo que el medio ambiente puede descargar. Su trabajo se discute con más detalle en el capítulo 7 .

Zotin [76] dice que la biosfera como un todo evoluciona en concordancia con las leyes de la termodinámica hacia un estado de equilibrio. No obstante algunos grupos de organismos evolucionan en dirección opuesta. El movimiento de un sistema abierto hacia un estado de equilibrio o estado estacionario ocurre de la manera más rápida, ("**Principio de más rápida descendencia**"). Por lo tanto tal movimiento tiene que ser acompañado por el desarrollo de subsistemas los cuales se mueven en dirección opuesta con incremento de la función disipación. Lo que explica que en la biosfera aparezcan organismos con altas razones metabólicas. El nacimiento de tales organismos aceleran el movimiento de la biosfera como un todo hacia un estado de equilibrio.

Zotin [77] dice que la función externa de disipación (la ec. (2.46) entre el volumen) es igual a la intensidad de producción específica de calor del organismo. Y puesto que para un sistema vivo la intensidad de producción de calor es proporcional a la razón de consumo de oxígeno. Establecieron como criterio de evolución

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\dot{q}_{O_2}}{dt} \leq 0 \quad (5.3)$$

lo que implica que la producción específica de calor y velocidades de respiración de la masa total de un organismo tienden a un mínimo. También establece un criterio de evolución que obedecen los sistemas organizados el cual esta dado por

$$\frac{d}{dt} (\bar{\psi}_d + \bar{\psi}_k - \bar{\psi}_n - \bar{\psi}_c) \leq 0 \quad (5.4)$$

donde  $\bar{\psi}_d$  es la función disipación externa promedio (en la notación del capítulo 2  $\bar{\psi}_d = \sigma_X/V$ ),  $\bar{\psi}_k$  esta relacionada a los proceso de regulación y control,  $\bar{\psi}_n$ , es la negantropía,  $\bar{\psi}_c$  esta relacionada con los proceso acoplados (en la notación del capítulo 2  $\bar{\psi}_c = \sigma_F/V$ ).

Santillan y col. [43] utilizan termodinámica de procesos irreversibles lineales, para evaluar el desempeño de un transformador de energía lineal. Donde la función de desempeño es la llamada función ecológica,  $E$ ,

$$E = P - T\sigma \quad (5.5)$$

que no es más que la potencia de salida del sistema,  $P$ , menos la potencia disipada por el sistema,  $T\sigma$ , donde  $\sigma$  es la producción de entropía total del sistema. Así el criterio de optimización consiste en maximizar la función ecológica. Que es equivalente al decir que el sistema opera en un estado de mínima disipación de energía. En particular muestra que la respiración via glucólisis de un organismo opera bajo el régimen ecológico, ya que maximiza la función ecológica. Y finalmente concluye que: "la elección del régimen de trabajo depende de las necesidades o ventajas evolutivas que este proporciona, lo cual puede ser diferente para cada especie".

Karo Michaelian [44] recientemente utilizó termodinámica de procesos irreversibles lineales para expresar la producción de entropía de un ecosistema en términos de la interacción entre los elementos bióticos y abióticos, de un ecosistema. Llegando a la conclusión de que bajo condiciones de la frontera constantes, un ecosistema evoluciona a un estado estacionario termodinámico estable. Lo cual se prueba tomando como función de Lyapunov la producción interna de entropía. Para un sistema muy perturbado y muy lejos del equilibrio, se mostró que la segunda ley de la termodinámica junto con un resultado más general de termodinámica irreversible, como el "universal evolutiva criteria", implica la evolución del ecosistema hacia estabilidad. Atractores de punto, cíclicos o caóticos son las soluciones permitidas en el espacio de las poblaciones. La evolución a estabilidad por evolución natural puede entonces ser visto como consecuencia directa de directivos termodinámicos.

Como podrá notarse existe un amplia literatura que trata de explicar la dinámica de un ecosistema desde un punto de vista termodinámico. A excepción de algunos trabajos se observa que los trabajos sobre ecosistemas están desarrollados basados en el concepto de exergía (energía libre). No obstante si consideramos el problema de optimización de un sistema desde el punto de vista, que buscamos minimizar la producción de entropía, lo que es equivalente a reducir las irreversibilidades dentro del sistema, los análisis exergéticos no son los más adecuados. Esto por que la exergía solo toma en cuenta los procesos asociados a la interacción del sistema con su ambiente y no los procesos cinéticos ocurridos dentro del sistema[45]. Por lo tanto concluimos que los análisis exergéticos no toman en cuenta la producción interna de entropía.

Por otro lado, puede observarse un acuerdo general de que los ecosistemas tienden a una alcanzar un estado estacionario en donde la disipación de entropía es mínima.

Por otro lado también nos motivan algunas afirmaciones recientes tales como las hechas por Jorgesen [46], que dice que es importante empezar a desarrollar un marco teórico universal en biología y en ecología, un marco que este más anclado en leyes generales tales como la física y la química. Ulanowicks [47] reconoce que muchos dicen que la ecología sufre la búsqueda de una teoría central, tales como las leyes de Newton en mecánica o la ecuación de Schrodinger en física cuántica. El sugiere que el **Principio de incremento de ascendencia**, como la respuesta a una primera pregunta ¿Como los organismos se distribuyen en el espacio tiempo?, pero deja sin responder preguntas tales como: ¿Como se explica la distribución log-normal del número de especies?, ¿Como se relaciona la diversidad de un ecosistema con su estabilidad?.

### 5.3. Modelos y análisis energéticos de agroecosistemas

El hombre desde la antigüedad a construido modelos para explicarse los fenómenos que ocurren en la naturaleza. Desde que el hombre fue agricultor empezó a establecer relaciones empíricas, por ejemplo notó que el estiércol de los animales hacia producir más la tierra, que las plantas necesitaban de agua y empezó a practicar la irrigación y la fertilización. Con el desarrollo de la ciencias básicas como la química, la física y la biología, los agrónomos ya no solo se conformaron con tener relaciones empíricas, si no empezaron a desarrollar modelos más detallados para estudiar los mecanismos que ocurren en las plantas de cultivo para así poder mejorar la producción agrícola. Por otro lado el desarrollo de la computadoras les permitió realizar simulaciones y verificar su modelos.

En Holanda, Wit fue el pionero en desarrollar modelo fenomenológico llamado ELCROS para simular el crecimiento de una planta o cultivo [48,22,49]. Tales modelo están basados en mecanismos físicos, químicos y fisiológicos involucrados en el proceso de crecimiento de una planta y un cultivo, más tarde en E.U. fue desarrollado un modelo llamado SPAM, por siglas en ingles soil-plant-atmosphere model [50,51]. El objetivo de estos modelos es entender los principales procesos en la planta y simular la respuesta de la misma a distintas condiciones ambientales, para identificar que factores son claves en el proceso productivo. Su ventajas es que permiten hacer un análisis sensitivo de los factores medio ambientales que afectan el crecimiento de una planta, y establecen relaciones fenomenológicas (causa-efecto). Su desventaja es que no permiten estimar la productividad total, los requerimientos de energía, la energía disipada, y la producción de entropía de un cultivo. Los libros [52-54] muestran aplicaciones de la física a fisiología de plantas.

Por otro lado surgieron modelos basados en el **análisis cultivo tiempo**, estos modelos son el producto de relaciones fenomenológicas basadas en la observación empírica de la respuesta de un cultivo o planta al cambio en una variable medio ambiental. Son un herramienta practica para analizar la respuesta de un cultivo a variaciones climáticas, (si los datos meteorológicos están disponibles), la desventaja de estos modelos es que son muy dependientes de los datos meteorológicos, y no aporta un detalles sobre los procesos ocurridos, además no permite hacer un análisis enérgico.

Otro acercamiento para modelar el crecimiento de un cultivo, es el empírico-estadístico. Que consiste en relacionar diversas variables (temporales o climáticas, características de suelo, tendencias del tiempo, etc) con la respuestas del cultivo, tales como la producción. Los coeficientes de peso de estas variables se obtienen a través de procedimientos estadísticos y análisis de regresión. La desventaja de estos modelos es que no dan una explicación de la relación causa-efecto, pero son útiles para estimar la producción [56-58].

La crisis energética de los 70's motivo el desarrollo de análisis energéticos de los sistemas involucrados en las actividades humanas, tales como la agricultura. Jones [59] dividió por nivel jerárquico de complejidad el **análisis energético de un agrosistema** en el siguiente orden: **1).-Análisis termodinámicos:** Georgesu [60] fue pionero al introducir la termodinámica de proceso fuera de equilibrio (a un nivel narrativo) a sistemas económicos y en especial a sistemas agrícolas; más tarde Ayres [61] también evaluó sistemas económicos desde la misma perspectiva, y más reciente Sverizhev [38] analizo un agroecosistema desde un marco más teórico.

2).-**Análisis ecológicos:** Odum [62] usa la metodología desarrollada por la ecología clásica, tales como diagramas de flujo a sistemas agrícolas y económicos, por otro lado se realizan Análisis económicos-ecológicos [63-64]. 3).-**Análisis de procesos:** (técnica mecanicista, para cuantificar todas las entradas de energía directas e indirectas al sistema basada sobre el flujo de materiales físicos), una característica de esta técnica es, las considerables fuentes de datos y el tiempo necesario para calcular sus valores, además de que en los balances de energía no se toma en cuenta la labor humana y la energía solar; Utilización de energía en cultivos [65], Balance de energía en cultivos [66]; Análisis socioeconómicos [67-69]. 4).-**Análisis de acuerdo al gasto de combustibles fósiles,** estos sólo toman en cuenta entradas de energía directa [71]. Después de la crisis de petróleo en 1970's surgió una ola de estudios energéticos en la agricultura en países industrializados. Ellos se basaron en cuantificar la entrada directa de combustibles fósiles al sistema e ignoraron la energía contenida en la labor y otras fuentes naturales (agua-suelo) [72].

## 5.4. Biología del desarrollo

En 1842, Julius Robert Mayer notó que los procesos metabólicos de un cuerpo generan calor el cual es emitido al ambiente en forma de radiación.

Los animales homeotermos (animales cuya sangre conserva una temperatura casi constante independientemente del medio en que viven, contrario a los poiquilotermos cuya sangre tiene una temperatura variable, más o menos semejante al medio en el que vive) mantienen su temperatura corporal por medio de reacciones químicas entre el alimento que asimilan y el aire que inhalan (metabolismo). Los colibríes tienen una razón desfavorable (superficie/volumen) es decir tienen más superficie por unidad de volumen, por lo que tienen que metabolizar a un ritmo increíble para mantener su temperatura corporal. Contrario a los animales grandes cuyo sistema interno de calefacción es más económico dado que tienen menos área superficial por unidad de volumen. Esto es por que entre más área superficial la pérdida de calor es mayor [73].

De esta observación empírica mediante un análisis dimensional llamado **alométrico**, se llegó a que la Tasa Metabólica Basal ( $BMR^2$ ) de un organismo en función de su masa,  $M$  está dado por  $BMR = cM^{\frac{3}{4}}$ , donde  $c$  es un constante de proporcionalidad característica de cada organismo y  $m$  es la masa del organismo, no obstante validaciones experimentales realizadas por Kleiber en 1932 [73,75] lo llevaron a establecer que

$$BMR = cM^{\frac{3}{4}} \quad (5.6)$$

Una explicación de la potencia fraccionada de la masa realizada por West, Brown y Enquist 1997, es que el sistema circulatorio tiene una geometría fractal lo cual ha causado una gran controversia.

Zotin y Zotina en [41] mediante experimentos calorimétricos con animales (ratones) notaron que la producción de calor de los animales aumenta con su crecimiento, mientras que el calor específico que es el calor liberado por unidad de masa el cual alcanzaba un máximo y empezaba a

---

<sup>2</sup>Por sus siglas en inglés, Basal Metabolic Rate

decrecer. Además observaron que en el fase de decrecimiento de la producción de calor específico, la herida de un organismo llevaba a un aumento local-temporal de la entropía del calor específico, pero eventualmente seguía decreciendo.

Cutler R. G. [75] propone la siguiente ecuación para la longevidad para los humanos y animales.

$$\text{Longevidad} = K \frac{\text{Reacciones protectoras}}{\text{Velocidad específica del metabolismo}} \quad (5.7)$$

La cual nos dice que los procesos metabólicos que se encargan de oxidar azúcares, grasas y proteínas, son procesos dañinos que causan envejecimiento. No obstante en el organismo hay reacciones protectoras que evitan la oxidación acelerada. Por lo tanto la longevidad disminuye entre mayores sean los procesos oxidativos y menor las reacciones protectoras.

# Bibliografía

- [1] James W. Haefner, *Modeling Biological Systems Principles and Applications*, CHAPMAN & HALL, ITP New York, (1996).
- [2] Jonathan Rongharden, *PRIMER OF ECOLOGICAL THEORY*, Prentice Hall, Upper Saddle river, New Jersey 07458. (1998).
- [3] Ted J. Case, *An Illustrated Guide to theoretical Ecology*, Oxford University Press, (2000).
- [4] Luis T. Guiterres y Willara R. Fey, *Ecosystem Successión*, The MIT PRES, (1980).
- [5] S.A.L.M Koojiman, *Dynamic Energy and Mass Bugets in Biological Systems*, Second Edition, Cambridge, Universty Press, (2000).
- [6] Howard T. Odum, *An energy Circuit Language for Ecological and Social Systems; its physical basis*, en System Analysis and Simulation in ecology, Edited by Bernad C. Pated, Vol II.(1972).
- [7] Maurice Sell, Samuel C. Sneduker, *Magrove Ecosistem Analysis*, en System Analysis and Simulation in ecology, Edited by Bernad C. Pated, Vol IV.(1972)
- [8] Robert F. Grant, *A review of the canadian ecosystem Model-ecosys*, en Modeling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management, Editado por M. J Shafer, Liwang Ma y S. Hasen, Boca Raton, Florida, Lewis, (2001).
- [9] Schrödinger, E. *What is Life?:* Cambridge University Press; (1944)
- [10] Priogine I. Nicolis G. y Babloyantz, *Thermodynamics of evolution*, Physics Today Nov (1972) pp. 23-28
- [11] Prigogine, I. ,*Thermodynamics of Irreversible Processes:* John Wiley & Sons; (1955).
- [12] Nicolis. G y Prigogine. I, *Self-Organization in Nonequilibrium Systems (From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations*, Jonh Wiley & Sons, (1977).
- [13] Nicolis. G. *Bifurcations, Fluctuations and Dissipative Structures*, in Nonlinear Phenomena in Physics and Biology, Editado por Richar H.Enns, Billy L. Jones, Robert M. Miura, Sadanand S. Rangnekar, Plenum Press, New york (1981)

- [14] Dilip Kondepudi y Ilya Prigogine, *Modern Thermodynamics (from heat engines to dissipative structures)*, John Wiley & Sons, (1998).
- [15] Ulanowicz, R.E. *Growth and Development: Ecosystem Phenomenology*, Springer-Verlag, (1986).
- [16] Ulanowicz, R.E., Hannon, B.M. , *Life and the Production of Entropy*, Proc. R. Soc. Lond B; (1987); 232: 181-192.
- [17] Jorgensen, S. E. and H. Mejer: *A holistic approach to ecological modeling*. Ecol. Modeling (1979); 7:169:189.
- [18] D.C Mikulecky, *Network thermodynamics: a unifying approach to dynamic nonlinear systems living systems*, en Theoretical studies of ecosystems the Network perspective, Editado por M. Migahi y T. P. Burns, Cambridge University Press, (1991).
- [19] Kleidon and Lorenz (eds), *Non-Equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy: Life, Earth, and Beyond*, Springer Verlag, for publication in Fall (2004).
- [20] Lotka A.J. , *Contribution to the energetics of evolution*. Proc Natl Acad Sci USA 8: 147-151.(1922)
- [21] Lovelock, J. E. & Margulis, L. (1974). *Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the gaia hypothesis.* , Tellus 36, 1-9.
- [22] Watson, A., Lovelock, J.E., (1983). Biological homeostasis of the global environment: the parable of daisyworld. Tellus 35B, 284-289.
- [23] Luigi Sertori, *Thermodynamics of Complex Systems*, Word Scientific Publishing Co. Ptd. Ltd. (1991)
- [24] Kay, J.J., . *A Non-equilibrium Thermodynamic Framework for Discussing Ecosystem Integrity*, Environmental Management, Vol 15, No.4, pp.483-495.(1991)
- [25] Schneider, E.D, Kay, J.J., "Life as a Manifestation of the Second Law of Thermodynamics", Mathematical and Computer Modelling, Vol 19, No. 6-8, pp.25-48. (1994)
- [26] James, J. Kay, Henry, A. Regier, Michelle Boylec, y Goerge Francisca, *An ecosystem approach for sustentability: adressing the challenge of complexity*, Futures 31 (1999) 721-742.
- [27] James, J. Kay, *Ecosystem as Self-Organization-Holarquic Open Systems: Narratives and the second law*, publish in Hanbook Theories and Mangament, ( S. E. Jorgensen and Felix Muller) CRC pres. Lewis Publish, pp. 135-160. (2000).
- [28] Folke Gunther, *Self-Organization in System far from Thermodynamics Equilibrium: Some clues to Structure and Function of Biological System*, tesis de licenciatura en filosofisa de sistemas ecologicos, junio (1994), DSENRMISU, Stokholm, Sweden.

- [29] A. Stanh, J. U. Keller, *The Entropic Waste Problem in Energy Engineering, Economy, and Ecology*, J. Non-Equilib. Thermodynamics (1999). Vol. 24, pp. 270-269.
- [30] Milan Straskraba, Sven E. Jørgensen, Bernard C. Patten, *Ecosystems emerging: 2. Dissipation*, Ecological Modelling 117 (1999) 3-39
- [31] Sven E. Jørgensen, Bernard C. Patten, Milan Straskraba, *Ecosystems emerging: 3. Openness*, Ecological Modelling 117 (1999) 41-64
- [32] Sven E. Jørgensen, Bernard C. Patten, Milan Straskraba, *Ecosystems emerging: 4. growth*, Ecological Modelling 126 (2000) 249-284
- [33] Sven E. Jørgensen, *Thermodynamics and Ecological Modelling*, Boca Raton : Lewis, (2002)
- [34] S. N. Nielsen, Thermodynamics of an ecosystem interpreted as a hierarchy of embedded systems. Ecol. Modelling 135 (2000) 279-289.
- [35] Søren N. Nielsen, Robert E. Ulanowicz, *On the consistency between thermodynamical and network approaches to ecosystems*, Ecological Modelling 132 (2000) 23-31.
- [36] Bhavik R. Bakshi, *A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering*, Computers and Chemical Engineering 26 (2002) 269-282.
- [37] Yu.M Svirezhev and A Svirejeva-Hopkins, *Sustainable Biosphere: critical overview of basic concept of sustainability*, Ecological Modelling 106 (1998) 47-61.
- [38] Yu. M Svirezhev, *Thermodynamics and Ecology*, Ecological Modelling 132 (2000) 11-22
- [39] Wolf Steinborn y Yuri M. Svirezhev, *Entropy as an indicator of sustainability in agro-ecosystems: North Germany case study*, Ecological Modelling 133(2000) 247-257
- [40] Yuri M. Svirezhev y Wolf Steinborn, *Exergy of solar radiation: information approach*, Ecological Modelling 145(2001) 101-110.
- [41] *Thermodynamics of Biological Process*, Editado por Ingolf Lamprecht y A. I. Zotin, W de G de Gruyter, (1978).
- [42] Roland Glaser, *Biophysics*, Springer, 1º edition, (1996).
- [43] M.Santillan, L. A. Arias-Hernandez y F. Angulo-Brown *Some optimization criteria for biological systems in linear irreversible thermodynamics*, IL NUOVO CIMENTO, Vol. (1998) D, N.1
- [44] Karo Michaelian, *Thermodynamic stability of ecosystems*, IF, UMAM, Open Archives <http://arxiv.org/abs/physics/0204065>
- [45] R. S. Berry, V.A. Kasakov, S. Sienioutycz, Z. Swast y A. M Tsirlin, *Thermodynamics Optimization of Finite-Time Processes*, John Wiley & Sons, (2000), Inglaterra, pp 2-4

- [46] Joao Carlos Marques, Sven Erik Jørgensen, *Three selected ecological observations interpreted in terms of a thermodynamic hypothesis. Contribution to a general theoretical framework*, Ecological Modelling 158 (2002) 213 /221.
- [47] Ulanowicz, R. E., *Some steps a central theory of ecosystem dynamics*, Computational Biology and Chemistry, 27 (6): 523-530 DEC (2003).
- [48] Wit, C. T. de. Brouwer, R. and Pennig de Vries, F. W. T. , *A dynamic model of plant and crop growth. Potencial crop production, a case study* , Wareing, P. P. and Cooper, J. R editors), Heinemann Educational Books Ltd. London, England, pp. 117-142.
- [49] J. Gudriann y H. H. Van Laar, *Modelling Potencial Crop Growth Process*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, (1994).
- [50] Shawcroft, R. W. , Lemon, E. R., Allen, L. H., Stewart, D. W. and Jensen, S. E : *The soil-plant-atmosphere model and some of its implications*. Agricultural Meteorology, (1974)14 (1/2), 210 pp.
- [51] Rasmus K. Ursem, Thieno Krink, y Bogdan Filipic, *A Numerical Simulation of a Crop-Producing Greenhouse*, EVALife Technical Report n0. (2002)-01.
- [52] Hamlyn G. Jones, *Plants and microclimate*, Cambridge University Press, (1992).
- [53] Daniel Hill, *Envioemnetal Soil Physics*, Academic Press, (1998).
- [54] Park S. Nobel, *Plant Physiology (Physicochemicla & environmental)*, 2° Ed. Academic Press, (1999).
- [55] Edmundo Torres Ruiz, *Agro-meteorología*, Editorial Trillas, (1995).
- [56] J. W. Hansen y J. W. Jones, *A System Framework for Characterizing Farm Sustainability*, Agricultural System 51 (1996) pp 185-201.
- [57] Robert K. Kaufmann y Seth E. Snell, *A Biophysical Model of Corn Yield: Integration Climate and Social Determinants*, American Journal Agricultural Economic 79 (1997) pag. 178-190.
- [58] Z. Y. Ma y Edwards-Jones, *Optimizing the External Energy Input into Farmalnd Ecosystem: a Case Study from Ningxia, China*, Agricultural System 53 (1997) pp 269-283.
- [59] M. R. Jones, *Analisis of the Use of Energy in Agriculture- Approaches and Problems*, Agricultural Systems 29 (1989) 339-355.
- [60] Georgescu-Roegen, N, *Energy analysis and economic valuation*. Suthern Economic Journal, 45, 1023-58. (1979)
- [61] Robert U. Ayres, *Eco-thermodynamics: economics and second law*, Ecological Economics 26 (1998), 189-209.

- [62] Odum H. T, *Problem formulation and quantification in energy analysis.*, Energy in Agriculture, 2, 1-10. (1984)
- [63] M. S. Alam, B. K. Bala, A.M.Z. HUQ, *Simulation of Integrated rural energy system for farming in Bangladesh*, Energy Vol. 6, pp. 591-599, (1997)
- [64] Jonh C. Woodwell, *A simulation model to illustrate feedbacks among resource consumption, production, and factors of production in ecological-economic systems*, Ecological Modelling 112 (1998), 227-247.
- [65] K. J. Hulsberg, B. Feil, S. Biermann, G. W. Rathke, W. D. Kalk, y W. Diepenbrock, *A method of energy balancing in crop production and its application in log-term fertilizer trial*, Agricultural Ecosystem and Environment 86 (2001) 303-321.
- [66] Karen Refsgaard, Niels Halberg y Erik Steen Kristensen, *Energy Utilization in Crop and Dairy Production in Organic and Conventional Livestock production Systems*, Agricultural Systems Vol.57 No 4 (1998) pp 599-630.
- [67] Piero Conforti y Mario Giampietro, *Fossil energy use in agriculture : an internacional comparison*, Agriculture Ecosystem and Environment 65 (1997) 231-243
- [68] Mario Gianprieto, Sandra G. F. Buckkens, y David Pimentel, *General Trends of Technological Changes in Agriculture*, Critical Reviews in Plant Sciences, 18(3):261-282 (1999).
- [69] Mario Gianprieto, *Socioeconomic pressure, demographic pressure, environmental loading and technological changes in agriculture*, Agricultural Ecosystem and Environmental 65 (1997) 201-229.
- [70] Pimentel, *Hanbook of Energy Utilization in Agriculture*. CRC Prese, Boca Raton, Fl (1980) No. 4.
- [71] Richar C. Fluck y C. Direlle Baird, *Agricultural Energetics*, AVI publishing company inc. Westport, Connecticut, (1980) pp.9
- [72] Rosamond L. Naylor, *Energy and Resource constraints on intensive agricultural production*, Anual Reviews Energy Environmental (1996), 21:99-123.
- [73] George Gamov, *Materia, Tierra y Cielo*, Ed. C.E.C.S.A, (1980) ( traducción de la segunda edición en ingles 1957).
- [74] Anastassia M. Makarievaw, Victor G. Gorshkovwand Bai-Lian Linz, *A Note on Metabolic Rate Dependence on Body Size in Plants and Animals*, J. theor. Biol. (2003) 221, 301-307.
- [75] Alberto Machado, *Envejecimiento biologico y salud* , Instituto de ciencias del hombre, (1986), Madrid
- [76] A. A. Zotin, I. Lamprecht, A. I. Zotin, *Bioenergetic Progress and Heat Barriers*, J. Non-Equilib. Thermodyn. (2001) Vol. 26 pp. 191±202

- [77] A. A. Zotin, A. I. Zotin, *Thermodynamic Bases of Develomental Process*, J. Non-Equilib. Thermodyn. (1996) Vol. 26 (1196) No.4. pp. 307-320.

## Capítulo 6

# Modelo de Sverizhev (un modelo basado en Termodinámica de Procesos Irreversibles)

### 6.1. Introducción

Este capítulo está basado en trabajos de Sverizhev [1-3], el cual analizamos a detalle en esta tesis, por su relevancia, ya que establece un marco teórico que permita definir sustentabilidad de un agroecosistema desde una perspectiva basada en leyes físicas.

### 6.2. Sustentabilidad de la biosfera

La población de humanos tiene que alcanzar un máximo debido a la cantidad finita de fuentes, (capacidad de sostenimiento del medio ambiente). Generalmente la regulación en la población se hace por la competencia de fuentes alimenticias, hambre, epidemias y (actualmente la competencia por los energéticos). Pero esta es una manera Maltusiana de regulación antihumanitaria. Hay otras alternativas de regulación como el control de natalidad, la cual en algunos países en desarrollo es muy difícil; y el aumento de la capacidad de sostenimiento del medio ambiente, es decir aumentar límite de población que puede soportar la Tierra. Esta última alternativa sólo es posible haciendo más eficientes los procesos, expandiendo las fuentes en el espacio físico y el cimiento de nuevas fuentes. Esta última alternativa es difícil ya que hay límites de eficiencia termodinámicos así como una cantidad finita de fuentes de recursos aprovechables.

Sverizhev analiza distintos puntos de sustentabilidad, la propuesta de cero crecimiento (demográfico y económico) propuesta por el Club de Roma. Y la propuesta de la Comisión Brund-

land conocida como "desarrollo sustentable". Planteándose la pregunta. ¿Puede en realidad existir el desarrollo sustentable para toda la tierra?. Antes de responderse la pregunta cita diversas frases del libro, **Our Common Future. From one Earth to one World (1987)** [4]. En es cual se define desarrollo sustentable como: "La habilidad de la humanidad para satisfacer sus necesidades presentes sin comprometer la habilidad de las futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades". Además de que se plantean las características principales de este desarrollo sustentable, como son la eliminación del hambre, igualdad de oportunidades de desarrollo para todos, crecimiento armónico de la población con el potencial productivo del medio ambiente, orientación adecuada de inversiones y desarrollo tecnológico. Todo es descrito tan bien que se dice el desarrollo sustentable es bastante realista y que no existe ningún límite biológico, químico, físico, natural y científico, que este depende sólo de las decisiones políticas. Lo cual es la partida de su critica ya que esto es más complicado y realmente existe el mito de desarrollo sustentable pero no el desarrollo sustentable en sí.

### 6.3. Modelo termodinámico de un ecosistema

Sverishev se plantea ¿Como describir el comportamiento de un ecosistema en términos físicos ? (En especial se plantea utilizar conceptos termodinámicos), ¿Que clase de criterios físicos pueden ser usados para estimar el impacto antropogénico sobre un ecosistema (agroecosistema)?.

Desde un punto de vista termodinámico uno puede considerar a un ecosistema en su estado maduro (clímax), como un sistema abierto fuera de equilibrio en estado estacionario, donde la producción interna de entropía del ecosistema es balanceada por un influjo negativo de entropía proporcionada por el medio ambiente. Es decir el medio ambiente, en este caso el sol, realiza trabajo para descargar la entropía producida por el ecosistema; a este mecanismo le podemos llamar "bomba entrópica", consideremos una unidad de la superficie terrestre ( $m^2$ , ha, etc.) ocupada por un ecosistema natural (estepa, bosque, etc.), mantenido en estado estacionario, cuyo periodo natural es de 1 año. La energía interna del sistema es incrementada en cada ciclo por un valor, la producción primaria bruta  $P_0$  (en calorías o Joules), la cual es la energía total que toma el sistema en cada ciclo.

La producción primaria bruta  $P_0$ , se divide en dos partes: 1) Es usada para la respiración y funciones esenciales del ecosistema (transformación de energía en calor por los proceso metabólicos); 2) La parte restante es la producción primaria neta  $P_0^n$ .

Y a su vez la  $P_0^n$  se divide en dos partes: 1) una parte es tomada por los consumidores; 2) otra parte se convierte en basura y otras formas de materia orgánica en el suelo. Si un ecosistema se encuentra en estado estacionario la destrucción anual de estructura biológica es igual a la producción anual de nueva estructura.

Sverizhev por simplicidad supone que las temperaturas y presiones en el ecosistema y en el medio ambiente son iguales.

Como sabemos la rapidez de generación de entropía de un sistema abierto está dada por

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{d_i S(t)}{dt} + \frac{d_e S(t)}{dt} \quad (6.1)$$

En un ecosistema la rapidez de generación interna de entropía está dada por

$$\frac{d_i S}{dt} = \frac{1}{T} \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{T} (R_v(t) + R_c(t) + D(t)) \quad (6.2)$$

donde  $T$  [K] es la temperatura en ese punto de la superficie de la tierra,  $R_v$  [J/s] es el calor liberado por el metabolismo de las plantas,  $R_c$  [J/s], es calor liberado por el metabolismo de los animales,  $D(t)$  [J/s] es calor liberado por la descomposición de materia orgánica muerta.

De la ec. (6.1) tenemos que

$$\int_t^{t+1} \frac{dS}{dt} = \int_t^{t+1} \left( \frac{d_i S}{dt} + \frac{d_e S}{dt} \right) dt \quad (6.3)$$

entonces de la ec. (6.2), suponiendo  $R_v \gg R_c$  (el metabolismo total del ecosistema es igual al metabolismo de su vegetación), tenemos de la ec. (6.3) que

$$S(t+1) - S(t) = \int_t^{t+1} \left( \frac{R_v(\tau) + D(\tau)}{T(\tau)} \right) d\tau - \underbrace{\int_t^{t+1} \left( \frac{d_e S}{dt} \right) d\tau}_{\delta_e S} \quad (6.4)$$

Utilizando el teorema del valor menor medio para integrales tenemos que

$$\begin{aligned} \int_t^{t+1} \frac{R_v(\tau)}{T(\tau)} d\tau &= \frac{1}{T(\theta_1^t)} \int_t^{t+1} R_v(\tau) d\tau = \frac{1}{T(\theta_1^t)} [P_0(t) - P_0^n(t)], \theta_1^t, \theta_2^t \in [t, t+1] \quad (6.5) \\ \int_t^{t+1} \frac{R_v(\tau)}{T(\tau)} d\tau &= \frac{1}{T(\theta_2^t)} \int_t^{t+1} D(\tau) d\tau = \frac{1}{T(\theta_2^t)} \tilde{D}_0(t) \end{aligned}$$

Donde  $P_0(t)$  [J] y  $P_0^n(t)$  [J] es la producción anual bruta (total) de calor y la producción anual primaria neta respectivamente,  $D(t)$  es la parte de materia orgánica muerta destruida anualmente,  $T(\theta_1^t)$  y  $T(\theta_2^t)$  son temperaturas anuales medias (las cuales pueden ser diferentes.)

Si suponemos que un ecosistema se mantiene en estado estacionario durante un año entonces, la parte de la materia orgánica muerta destruida es igual a la captación neta de energía en un año, es decir  $D(t) = P_0^n$ , y además  $S(t) - S(t+1) = 0$ , entonces de (6.4) y (6.5) tenemos que

$$\delta_e S = \frac{1}{T(\theta_1^t)} P_0(t) + \left[ \frac{1}{T(\theta_1^t)} - \frac{1}{T(\theta_2^t)} \right] P_0^n(t) \quad (6.6)$$

Por otro lado si se considera que

$$\int_t^{t+1} R_v(\tau) d\tau = \int_t^{t+1} r(\tau) p_0(\tau) d\tau = r(\theta_3^t) \int_t^{t+1} p_0(\tau) = r(t) P_0, \theta_3^t \in [t, t+1] \quad (6.7)$$

donde  $r(\tau)$ ,  $p_0(\tau)$  son respectivamente los coeficientes de respiración y producción primaria bruta dentro de un intervalo de un año,  $r(t) = r(\theta_3^t)$  es el coeficiente de respiración media. Tenemos que la producción primaria neta puede expresarse como  $P_0^n(t) = [1 - r(t)]P_0$ . (Nota.  $r(t)$  es adimensional) Entonces podemos escribir la ec. (6.6) como

$$\delta_e S = \left\{ \frac{1}{T(\theta_1^t)} \left[ \frac{2 - r(t)}{1 - r(t)} \right] - \frac{1}{T(\theta_2^t)} \right\} P_0^n \quad (6.8)$$

Suponiendo que la respiración, la fotosíntesis, y la descomposición de materia orgánica muerta ocurren a una temperatura media de activación  $T$ , se llega a que

$$\delta_e S = \frac{P_0}{T} = \frac{1}{1 - r} \frac{P_0^n}{T} \quad (6.9)$$

El significado de esta ecuación es que la producción interna de entropía del sistema es descargada por la "bomba de entropía" solar (condición de estado estacionario).

Es importante notar que los procesos de formación de nueva biomasa y su posterior degradación representan una cadena compleja de múltiples reacciones químicas y bioquímicas. No obstante Sverizhev supone que la producción de entropía sólo depende de las características termodinámicas de los elementos iniciales y finales.

Por otro lado supone también que, la entropía que es producida por la destrucción de estructura química es considerablemente menor que la entropía calórica. Por lo que en las ecuaciones de balance esta puede ser despreciada.

### 6.3.1. Sobreproducción de entropía en un agroecosistema

Un agroecosistema es un ecosistema que está bajo la influencia de presión antropogénica, i.e. hay un flujo de energía proporcionada por la especie humana ( $W$ , flujos de energía más flujos de químicos) hacia dentro del sistema. Este flujo es disipado en el interior del sistema en forma de calor y, además, modifica la productividad de las plantas. Si  $P_1$  es la producción primaria bruta bajo presión antropogénica (Es claro que con la influencia antropogénica, el aprovechamiento de la energía solar que llega al sistema se incrementa<sup>1</sup>) y suponiendo que un ecosistema se mantiene en estado estacionario a pesar de las perturbaciones antropogénicas. Obtenemos que

$$\delta_e^1 S = \frac{(W + P_1)}{T} \quad (6.10)$$

Aquí es donde se introduce una importante suposición: Parte de esta entropía es  $\delta_e^1 S$  es descargada por la "bomba de entropía" en la cantidad  $\delta_e S = P_0/T$ , i.e. el ecosistema natural proporciona potencia. (Las condiciones ambientales locales se organizan de tal manera que el estado estacionario se mantiene sin degradación medio ambiental).

Haciendo la suposición de que la transición de un ecosistema natural (sin influencia del humano) a uno antropogénico (influencia del humano) es suficientemente rápida, tal que la

<sup>1</sup>Al aplicar fertilizantes y agua el tamaño de las hojas aumenta y por lo tanto también aumenta la captación de energía solar

"bomba de entropía" no cambia. Tenemos que la parte de la entropía no compensada por la "bomba de entropía" es

$$\sigma_e = \delta_e^2 S = \delta_e^1 S - \delta_e S = (W + P_1 - P_0)/T \quad (6.11)$$

La única manera de compensar  $\sigma_e > 0$ , es por medio de un flujo exterior de entropía hacia el medio ambiente (la degradación puede deberse a calentamiento, contaminación química del agua y el suelo e impacto mecánico). De la ec.(6.11) tenemos que

$$\sigma T = W + P_1(W) - P_0 \quad (6.12)$$

En esta ecuación  $P_1$  depende de  $W$ .

Otro problema es el calculo de  $P_0$  (¿cómo definir la productividad de ecosistema natural?). Esto se soluciona pensando que una vez que las entradas antropogénicas son retiradas del ecosistema este evoluciona a su estado natural dependiendo del grado de deterioro del ecosistema. En lo general se hace la suposición de que el impacto antropogénico es débil, permitiendo así una sucesión reversible hacia el estado natural, también se supone que período de sucesión hacia el estado natural es del orden de la unidad del período natural del sistema, adicionalmente se supone que la sucesión es un proceso *quasi*-estacionario. Así el paso siguiente de la sucesión al retirar la influencia antropogénica del ecosistema es el sistema natural (Esto se hace con el fin de trabajar con termodinámica de equilibrio, pero tiene la desventaja que no se pueden hacer extrapolaciones de la evolución del sistema para escalas de tiempo grandes).

Finalmente el sentido del cálculo del valor  $\sigma$  es que puede ser usado como criterio para cuantificar la degradación medio ambiental o "la cuota entropica" que tiene que ser pagada por nuestra sociedad (sufriendo de la degradación medio ambiental) a través de las modernas industrias tecnológicas. Aunque hay otras maneras de compensar esta producción de entropía con entradas adicionales de energía (de baja entropía). Las cuales se gastarían en la recuperación del suelo, control de contaminación (tecnologías ecológicas).

### 6.3.2. Producción de entropía de la vegetación

Si vemos a la vegetación como un sistema termodinámico abierto entonces el cambio de entropía, causado por la fotosíntesis puede expresarse mediante la ec.(6.1) donde como vimos  $d_i S$  se debe a la disipación de energía en el interior de la cubierta vegetal al realizar sus funciones metabólicas. La razón de producción de entropía del sistema se debe principalmente a dos procesos de disipación de energía, la radiación de calor y la evotranspiración [1]. La contribución del primero puede expresarse como

$$\left(\frac{d_i S}{dt}\right)_{qw} = q_T \frac{\delta T}{T^2} \quad (6.13)$$

y la del segundo con la siguiente expresión

$$\left(\frac{d_i S}{dt}\right)_{T, q_T} = \gamma q_w \frac{\delta p_m}{T} \quad (6.14)$$

Entonces la producción interna de entropía está dada por

$$\frac{d_i S}{dt} = q_T \frac{\delta T}{T^2} + \gamma q_w \frac{\delta p_m}{T} \quad (6.15)$$

donde  $T$  es la temperatura media del sistema hoja-aire,  $\delta T$  es la diferencia de temperatura entre las hojas y el aire de sus alrededores,  $q_T$  representa el flujo de calor,  $\gamma = 600$  cal/g de agua, es el calor de formación de vapor de agua,  $q_w$  es el flujo de agua evotranspirada, y  $\delta p_m$  es la diferencia de humedad específica entre la hoja y el aire. El balance de energía del ecosistema es

$$\underbrace{P_0^n}_{\text{Producción primaria neta}} = \underbrace{P_0}_{\text{Energía neta aprovechada}} - \underbrace{T(d_i S/dt)}_{\text{Energía disipada}} * 1 \text{ año} \quad (6.16)$$

donde  $P_0 = (Phar - E_1)$  con  $Phar$  es la radiación solar (que llega al sistema) y  $E_1$  representa las pérdidas por gasto y asimilación fotosintética.

Si se considera separadamente la entrada de elementos químicos al sistema para mantener la concentración molar  $C_i (i=1, \dots, n)$  de estos elementos en el interior del sistema (carga química) y llamamos a  $C_{i0}$  la concentración natural de los elementos en el ecosistema. Podemos generalizar la ec(6.12) como sigue.

$$\sigma T = W + RT \sum_{i=1}^n \ln(C_i/C_{i0}) q_i + P_1 - P_0 \quad (6.17)$$

donde  $A_{i,i0} = RT \ln(C_i/C_{i0})$ , es la afinidad y  $q_i$  es el flujo correspondiente al  $i$ -ésimo elemento químico.

### 6.3.3. Sobreproducción de entropía en un sistema agrícola

Sea  $P_1$  la producción anual bruta (total) de un agroecosistema, entonces la producción anual neta del agroecosistema es igual  $(1 - r)P_1$  donde,  $r$ , es el coeficiente de respiración, el término,  $rP_1$ , describe las pérdidas por respiración. La fracción  $k$ -ésima de la producción neta es en esencia extraída por la cosecha, así el cultivo cosechado es igual a

$$y = k(1 - r)P_1 \quad (6.18)$$

donde ( $k \leq 1$ ) puede ser visto como la eficiencia de extracción de producto.

La fracción restante  $(1 - k)(1 - r)P_1$  es transferida a la basura y al suelo. Considerando que esta es descompuesta y quemada. Y que la fracción de producción extraída no contribuye a la

producción de entropía local. El balance de entropía en el sistema es

$$\sigma T = \underbrace{W}_{\text{energía entrando}} + \underbrace{(1-k)(1-r)P_1}_{\text{descomposición}} + \underbrace{rP_1}_{\text{respiración}} - \underbrace{P_0}_{\text{bomba de entropía}} \quad (6.19)$$

donde  $P_0$  es la producción bruta de un ecosistema en estado natural. El problema es estimar la relación entre  $W$  y  $P_1$ . De los análisis eco-energéticos de Pimentel (1980),  $y = \eta W$ , donde  $\eta$  es un coeficiente de eficiencia, el cual fue calculado para diferentes agrosistemas en distintos países. Este coeficiente es una modificación del bien conocido coeficiente termodinámico de eficiencia, excepto que este puede tener valores mayores que 1. En realidad se debería considerar la energía solar  $E_s$ , por lo tanto  $\eta' = (y/W + E_s)$ . Pero linealizando  $y = y(W, E_s)$  alrededor de  $W = 0$ , se llega a que  $y = y(W, E_s) \approx y(0, E_s) + (\partial y/\partial W)_0 W$ . Despreciando el primer término tenemos que  $\eta = (\partial y/\partial W)_0$ . Esto no es estrictamente riguroso, pero permite usar parte de la información empírica disponible. Teniendo en cuenta que  $y = \eta W$  y llamando  $s = k(1-r)$ , de la ec(6.19) tenemos que

$$\sigma T = W(1 - \eta + \frac{\eta}{s}) - P_0 = y(\frac{1}{\eta} + \frac{1}{s} - 1) - P_0 \quad (6.20)$$

Svirezhev en [3] utiliza la ec(6.20) para calcular  $\sigma$  para un cultivo de maíz en Hungría, llegando a que  $\sigma T = 0,8 \times 10^{11}$  J/ha. Y concluye que para compensar la degradación medio ambiental se requiere a aumentar en un 300% la energía de entrada (sin aumentar la productividad) la cual sería gastada en la recuperación del suelo, control de contaminación, etc. El sistema puede estar en equilibrio dinámico y existir por largo tiempo solo si  $\sigma = 0$  (no hay crecimiento entropico), de esta condición se puede estimar la energía artificial  $W$  máxima (límite de carga de energía) que podemos suministrar al sistema sin degradar el ambiente. De la ec(6.20) tenemos que

$$W_{cr} = \frac{P_0}{1 - \eta - (\eta/s)} = 16 \text{ GJ/ha} \quad (6.21)$$

Svirezhev valida en parte su modelo comparando el valor de  $W_{cr}$  obtenido con la ec(6.21) y el valor del **límite de energía de carga** obtenido por otros autores empleando otros métodos, que da un valor 15 GJ/ha. De la ec(6.20) también se puede calcular la producción máxima de un cultivo(en materia seca) para que sea **sustentable** o **ecológico**, en este caso:

$$y_{cr} = \frac{P_0}{(1/s) + (1/\eta) - 1} = 2 \text{ t/ha} \quad (6.22)$$

Estos resultados fueron utilizados en [3] para analizar la sustentabilidad de varios cultivos en una región al norte de Alemania en dos años (1988 y 1997) llegando a la conclusión de que estos campos agrícolas están lejos de alcanzar el equilibrio dinámico, además de que el manejo de los cultivos y las entradas al agroecosistema influyen en la sobreproducción de entropía de éste. Estos resultados sugieren que podría estudiarse mejor la correlación entre la producción de entropía y el patrón de flujos de entrada al sistema y sus interacciones.

Con el marco teórico desarrollado se muestra que la intensificación de la agricultura puede fracasar.

El principal proceso de degradación es la erosión del suelo, en el cual intervienen dos procesos, la erosión por destrucción mecánica de las partículas del suelo haciéndolas polvo, permitiendo que sean más fácilmente arrastradas por el viento y el agua, y la erosión por la quema de materia orgánica (destrucción de estructura química, y microorganismos). Por lo tanto  $\sigma_{suelo}T$  debería tener dos términos, uno asociado al impacto mecánico y otro al impacto químico. Uno podría pensar que eliminando el impacto mecánico (por arar el suelo), el valor de  $\sigma_{suelo}T$  disminuiría en la mitad, pero para mantener la productividad se necesitaría la introducción de más químicos (fertilizantes), entonces ahora el factor principal de erosión del suelo sería la contaminación química como la acidificación, salinización, etc. Por lo tanto, mantener una alta productividad agrícola se traduce en "cuota entrófica" para la sociedad en forma de degradación. Además de que la erosión del suelo en un 40% hace declinar la productividad de las cosechas, de cinco a siete veces. Lo cual puede traer consigo un desastre agrícola.

## 6.4. Conclusiones

### 6.4.1. Ventajas:

1. El modelo desarrollado por Sverizhev op cit. es atractivo ya que es sencillo matemáticamente y explica la esencia del problema de sustentabilidad desde un punto de vista físico-teórico.
2. El modelo nos da información sobre la eficiencia del sistema.
3. Nos permite calcular el impacto agroecosistema sobre el medio ambiente
4. Podemos calcular condiciones de operación en cuanto entradas de materia y energía para el sistema de modo que el impacto sobre el medio ambiente sea mínimo.

### 6.4.2. Desventajas:

1. No toma en cuenta todos procesos irreversibles que ocurren dentro y fuera del sistema dentro del sistema, Por ejemplo, la toma de nutrientes y agua del suelo por la planta, y la toma de  $CO_2$  de la atmósfera (fuentes de baja de entropía que son acumulados y disipados en el interior del sistema).
2. No se llega una correlación entre la productividad del sistema y la disipación de los flujos de energía e interacciones de los flujos de entrada. Una motivación para hacer esto es la siguiente pregunta ¿cual es la mejor manera en la que deberían acoplarse los flujos para minimizar la disipación de potencia en el sistema?.
3. No se establece un relación analítica entre  $P_1$  y las entradas  $W$  de energía y de materia al sistema.

4. No se hace un balance de entropía para el suelo y la atmósfera.
5. No establece un método para calcular  $P_0$  de manera analítica.

#### **6.4.3. Camino a seguir:**

Establecer primero las fronteras del sistema a estudiar, identificar los principales flujos que entran y salen del sistema, los procesos irreversibles dentro del sistema, los procesos irreversibles debido a la interacción del sistema con su medio ambiente, la interacción de estos procesos y su relación con la producción neta del sistema (cosecha).

# Bibliografía

- [1] Yu.M Svirezhev and A Svirejeva-Hopkins, *Sustainable Biosphere: critical overview of basic concept of sustainability*, Ecological Modelling 106 (1998): 47-61.
- [2] Yu. M Svirezhev, *Thermodynamics and Ecology*, Ecological Modelling 132 (2000):11-22
- [3] Wolf Steinborn y Yuri M. Svirezhev, *Entropy as an indicator of sustainability in agroecosystems: North Germany case study*, Ecological Modelling 133(2000) 247-257.
- [4] Our Common Future. *From one Earth to one World*, A report of Brundtland Commission. Oxford University Press, (1987), Oxford, NY.

## Capítulo 7

# Nuestra contribución teórica

### Resumen

En este capítulo se muestran las contribuciones teóricas sobre ecosistemas, agroecosistemas y estructuras biológicas disipativas que se desarrollaron en esta tesis.

En la 1ª sección se muestra una teoría sobre el tiempo de vida o vida útil de estructuras disipativas, en la cual se postula un nuevo principio que se aplica a cualquier estructura disipativa. En la 2ª sección se introduce el concepto de daño funcional y la funcionamiento remanente porcentual. En la 3ª sección se analiza como el incremento de la función disipación de Rayleigh respecto a su valor mínimo afecta el tiempo de vida de una estructura disipativa. En la 4ª sección se muestra un modelo del envejecimiento celular. En la 5ª sección se analiza el ritmo metabólico total de los mamíferos. En la 6ª sección se realiza una descripción termodinámica de las etapas de desarrollo de un ser vivo en particular de un humano. En la 7ª sección se explica el efecto de la radiación gama en las semillas de ajonjolí y su crecimiento posterior. En la 8ª sección se muestra un modelo del tiempo vida de las hojas de las plantas. En la 9ª sección se muestra un modelo fenomenológico y mecanicista de un ecosistema a nivel abstracto. En la 10ª sección se muestra un modelo de un ecosistema y un agroecosistema a nivel de detalle, en el cual también se realiza un análisis comparativo entre un agroecosistema y un agrosistema. En la 11ª sección se realiza un breve modelo y análisis de la respuesta de un cultivo a dos perturbaciones.

### 7.1. Tiempo de vida o vida útil de una estructura disipativa (Termodinámica del envejecimiento)

Una fuente recurrente de problemas para la especie humana son los procesos de envejecimiento continuo de las máquinas que producimos y de los seres vivos: animales, plantas y hongos; no sólo envejecen sino que no duran para siempre. ¡Ah! también algunas máquinas naturales no biológicas envejecen, por ejemplo las estrellas (ver figura 7-1).

¿Porqué envejecemos? Existen muchas teorías.

¿Podemos retrasar el envejecimiento?, existe mucho trabajo experimental al respecto. Véase

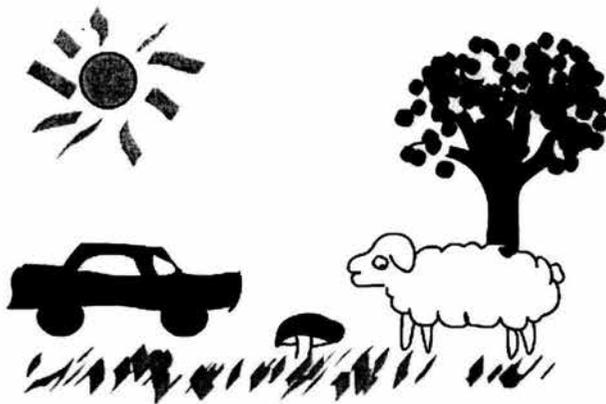


Figura 7-1: Estructuras disipativas que envejecen

el el trabajo clásico de C. Mc. Cay de la Universidad de Cornell, Ithaca, N. Y. en 1930 (citado por [1]) acerca del problema de restricción calórica en ratas de laboratorio y sus consecuencias en duplicar la duración media de la vida de las mismas.

¿Qué es lo relevante?. En fenómenos complejos existen tantos parámetros interactuantes dentro del sistema que es muy difícil separar causas de efectos. No es raro pues que acerca del cuerpo humano cada especialista en hígado, riñones, corazón, etc. piensen que lo suyo es lo único que determina la duración máxima de la vida. Otros consideran que el sistema hormonal es lo fundamental; algunos asignan un papel especial al cerebro; unos más piensan que el medio ambiente es lo importante; otros ven en los fenómenos intrínsecos al ser vivo lo importante. Existe quien imagina que existe un reloj celular que marca la duración máxima; o se piensa que el cerebro tiene ese reloj que determina el momento de la muerte... ¡Imaginemos otro Mecanismo!

¿Cómo puede ver el fenómeno de la vida un físico? Como ya mencionamos en el capítulo 5, en 1947 E. Schoridinger en su libro clásico "¿Que es la vida? op. cit.", estableció claramente que: **los seres vivos sólo pueden ser entendidos en el marco teórico de la termodinámica**; lo cual implicaba que estos crecían y organizaban su estructura interna a costa de un flujo de energía del exterior capaz de realizar el trabajo requerido para el efecto. Alrededor 1971 I. Prigogine op. cit. comienza a uniformizar desarrollos teóricos sobre termodinámica de procesos irreversibles y desarrolla diversos teoremas relativos a sistemas disipativos de tipo biológico. Con estos trabajos continua una línea que 1973 comenzó a desarrollar Oparin: El estudio del surgimiento de sistemas disipativos ordenados a partir de materia desordenada y energía libre capaz de realizar trabajo. En este esquema un ser vivo es un sistema o máquina de creciente autoorganización el cual requiere un flujo de "materia provista de energía libre capaz de realizar trabajo." alimentos, los cuales procesa interiormente con ello crece su estructura, vive,

desecha residuos y se reproduce.

¿Cuáles son los elementos esenciales que vamos a considerar nosotros de Procesos Irreversibles para abordar el problema?. La primera ley de la termodinámica dada por la ec. (2.6)

$$dU = dQ - PdV \quad (7.1)$$

que se refiere a la **conservación de la energía**, y la segunda ley de la termodinámica dada por la ec. (2.33)

$$\frac{d_i S}{dt} = \sum_k J_k X_k > 0 \quad (7.2)$$

la cual dice que **para cualquier proceso irreversible la rapidez de generación de entropía es siempre mayor que cero**. Como ya mencionamos en el capítulo 2, la entropía es la medida del desorden del sistema, pero en realidad "S" nos da una idea clara de **cuando un proceso físico es posible** que ocurra en la naturaleza. La condición para que ocurra un proceso en la naturaleza, es que el cambio con el tiempo de la entropía del sistema sea mayor o igual a cero. Esto es,

$$\Delta S_{sit} = S(t) - S(t - dt) \geq 0 \quad (7.3)$$

La ecuación (7.3) establece una condición para la ocurrencia de un cambio espontáneo.

Antes de empezar nuestro desarrollo es necesario recalcar la diferencia que existe entre un estado en equilibrio termodinámico y un estado fuera de equilibrio termodinámico de un sistema abierto. En un estado equilibrio termodinámico las fuerzas netas son cero y las velocidades netas dentro del sistema son cero, por lo tanto la necesidad de potencia externa para mantener el estado de equilibrio del sistema es cero, es decir la en equilibrio la disipación de potencia es cero. (ver figura 7-2-a).

¡Por lo tanto la vida es un proceso fuera de equilibrio termodinámico!, dado que requiere potencia externa para mantenerse. ¿Pero qué es un sistema fuera de equilibrio termodinámico?. La figura 7-2-b ilustra tal estado, ¿Quién o qué es lo que impide que el sistema representado por la canica caiga a la situación de mínima energía libre?. Primero que nada en estos sistemas las fuerzas,  $X_k$  y flujos,  $J_k$  generalizados son distintos de cero, por lo tanto la potencia disipada por el sistema es distinta de cero. El sistema no alcanza el estadio de equilibrio porque recibe continuamente potencia de origen externo la cual sostiene los procesos fuera de equilibrio. Así la vida es un proceso fuera de equilibrio termodinámico mantenido por potencias externas, por ejemplo las plantas necesitan del sol, nosotros los humanos necesitamos comer. Pero todo tiene un costo, para aumentar el orden y la estructura del sistema (disminuir la entropía del sistema) hemos de disminuir el orden (aumento de la entropía) de los alrededores en mayor medida.

Es bien sabido que un organismo puede describirse a través de su **Tasa Metabólica Específica (TME<sup>1</sup>)**  $\dot{\theta}$  [W/kg] o [cal/g/día][1].

¿Que hacer para describir un estructura disipativa en términos de su **rapidez de gen-**

---

<sup>1</sup>SMR en inglés por sus siglas Specific Metabolic Rate, término usado en trabajos de medicina y biología

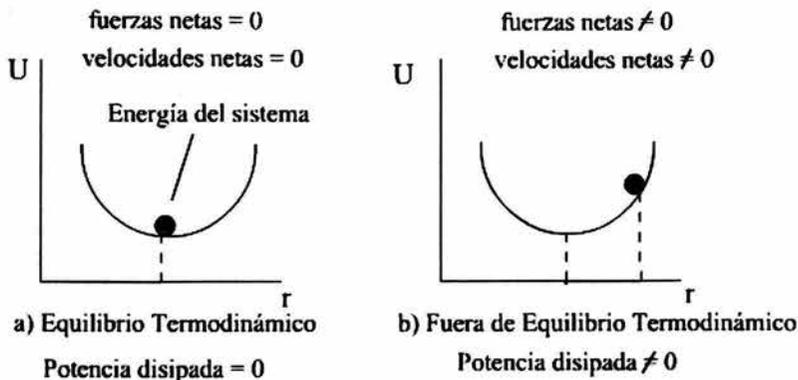


Figura 7-2: Diferencia entre un estado en equilibrio y fuera de equilibrio termodinámico

eración de entropía?. El truco conceptual es ver la rapidez de generación de entropía,  $(d_i S/dt)$  [J/K] como la potencia disipada por el sistema dividida por la temperatura  $T$  [K]. Entonces la rapidez de generación de entropía por unidad de masa (**rapidez de generación de entropía específica**,  $\dot{S}_{ie}$  [J/K/kg]) de un sistema puede escribirse como

$$\dot{S}_{ie} = \frac{1}{M} \left( \frac{d_i S}{dt} \right) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^n J_k X_k = \sum_{k=1}^n J_{ke} X_k = \frac{\phi_R}{T} \geq 0 \quad (7.4)$$

donde  $M$  [kg] es la masa total del sistema,  $J_{ke} = J_k/M$  y  $X_k$  son los **flujos específicos** (flujos por unidad de masa) y **fuerzas generalizadas** que ocurren en el sistema,  $\phi_R$  [W/kg] es la **función disipación específica**[2] (conocida como **función disipación de Rayleigh** [3]) definida como

$$\phi_R = \frac{T}{M} \frac{d_i S}{dt} = T \sum_{k=1}^n J_{ke} X_k \geq 0 \quad (7.5)$$

que no es más que la potencia total disipada por unidad de masa, por el sistema debida a los procesos irreversibles que ocurren en su interior. Para un ser vivo la **función disipación de Rayleigh** es igual a la **Tasa Metabólica Específica**,  $\theta_i$  [W/kg].

$$\phi_R = \theta \quad (7.6)$$

La función disipación Rayleigh puede ser medida fácilmente mediante técnicas calorimétricas, por ello se va a utilizar en el análisis del tiempo de vida de una estructura disipativa. ¿Cómo es la función disipativa Rayleigh para un ratón durante su desarrollo? ¿Y que podemos decir para los seres humanos?. Usualmente la función disipación de Rayleigh (potencia química, física, eléctrica...por unidad de masa) que actúa sobre el sistema fuera de equilibrio tiene la forma

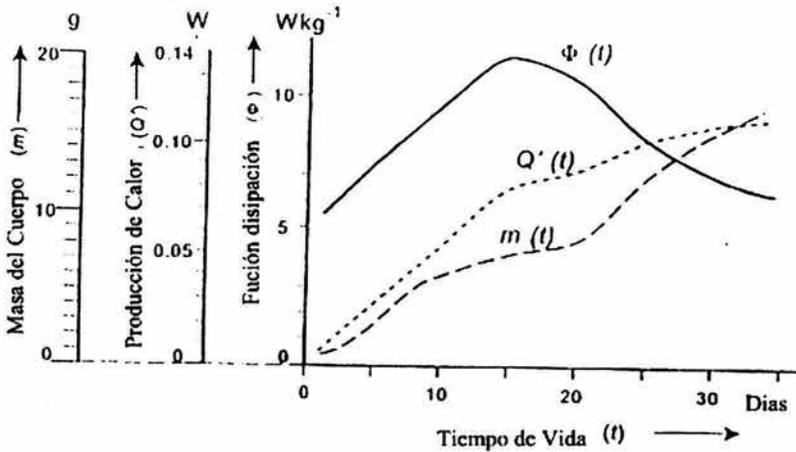


Figura 7-3: Curvas experimentales metabólicas de un ratón ( Tomada de [5])

mostrada en la figura 7-5. (ver figuras 7-3 y 7-4).

Como se puede ver en la figura 7-5 la curva de la función disipación de Rayleigh la podemos dividir en cuatro regiones.

**I. -Etapa transitoria.** Esta etapa está caracterizada por la creación de la estructura disipativa y está dividida en dos subregiones, una en la cual  $\phi_R$  crece hasta llegar a un máximo y otra en la cual  $\phi_R$  después de alcanzar su valor máximo disminuye hasta alcanzar un valor mínimo  $\phi_{REE}$  en el estado estacionario, de acuerdo con el **principio de mínima generación de entropía** para sistemas lineales que evolucionan a un estado estacionario, la cual dice que, todo sistema disipativo (aún no lineal) fuera de equilibrio termodinámico evoluciona a través del tiempo con una tendencia monótona de disminución en la rapidez de generación de entropía i.e.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{M} \frac{d_i S}{dt} \right) = \frac{d}{dt} \left( \frac{\phi_R}{T} \right) \leq 0 \quad (7.7)$$

No obstante nótese que existe una región inicial dentro del transitorio donde no se cumple la desigualdad (7.7).

**II Estado estacionario.** Es la etapa de madurez de una estructura disipativa en la cual la rapidez de creación de nueva estructura disipativa se ve exactamente balanceada por la rapidez de destrucción de la vieja estructura y está caracterizado macroscópicamente por un valor mínimo y constante de la función disipación de Rayleigh ó rapidez de generación

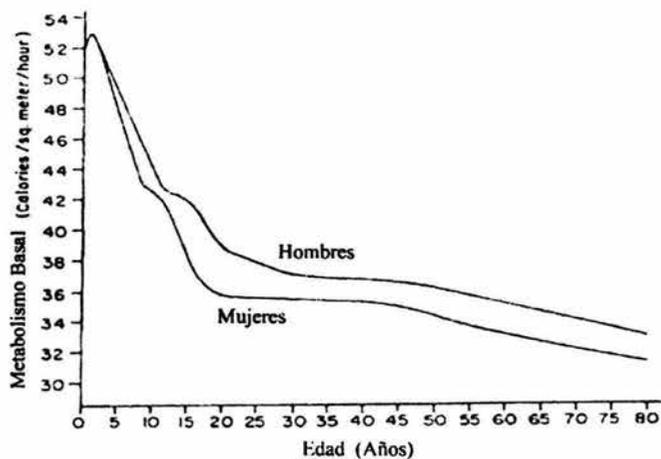


Figura 7-4: Velocidad metabólica basal normal a diferentes edades para cada sexo. (Tomada de [6])

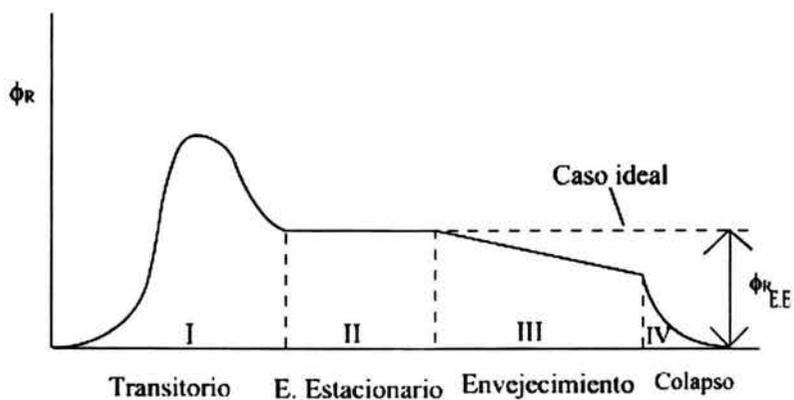


Figura 7-5: Función disipación de Rayleigh durante la evolución ontológica de una estructura disipativa

de entropía por el sistema. Este valor  $\phi_{REE}$  depende de cada sistema disipativo y de las condiciones externas a las que está sometido el sistema.

**III. -Envejecimiento.** El tiempo de duración de los estados estacionarios, no es infinito debido al carácter atómico de la materia; la duración finita se debe en esencia al aumento de desorden funcional dentro del sistema de que va dificultando de manera creciente la estabilidad funcional de la estructura disipativa y finalmente da lugar a un colapso del sistema. En esta etapa la función  $\phi_R$  disminuye linealmente con el tiempo. (ver figura 7-4)

**IV. Colapso.** En esta etapa el desorden funcional de la estructura disipativa es tal, que no puede operar más y el sistema evoluciona a un estado de equilibrio en el cual el su desorden funcional es máximo y su función disipación de Rayleigh es prácticamente cero.

¿Como podemos sintetizar la información experimental respecto a las plantas, animales, hongos y máquinas abióticas naturales artificiales?.

Se postula el siguiente principio:

**"Toda estructura disipativa la cual genere entropía neta a través de varios ciclos funcionales tendrá un límite superior a la cantidad total de entropía específica generada por el sistema y por lo tendrá una duración temporal finita".** Ver figura 7-6.

¿Como podemos avanzar en el estudio de sistemas disipativos por éste camino?

De acuerdo al principio antes enunciado el área bajo la curva 7-6 es una constante.

$$\int_{t_{ii}}^{t_f} \frac{1}{M} \left( \frac{d_i S}{dt} \right) dt = \frac{K_S}{T} \quad (7.8)$$

donde  $K_S/T$  [J/K/kg] es límite máximo a la cantidad total de entropía específica generada por el sistema, en este proceso disipativo isotérmico(ver figura 7-6). Es importante mencionar que  $K_S$  [J/kg] es una constante que varía de acuerdo a la estructura disipativa que se trate. Para una estructura disipativa biológica en estado estacionario prácticamente podemos considerar la  $M$  de la estructura como constante, para una estructura disipativa construida por el hombre la  $M$  es una constante.

Como la función  $d_i S/dt$  depende del tiempo podemos llevar a cabo la siguiente aproximación mediante el uso de teorema del valor medio (ver figura 7-7).

$$\int_{t_i}^{t_f} \frac{1}{M} \left( \frac{d_i S}{dt} \right) dt = \frac{1}{M} \left( \overline{\frac{d_i S}{dt}} \right) (t_f - t_i) = \overline{S}_{ie} (t_f - t_i) = \frac{K_S}{T} \quad (7.9)$$

donde  $\overline{S}_{ie}$  es la rapidez de generación entropía específica media de la estructura disipativa. La ec. (7.9) puede aplicarse a cualquier sistema disipativo mediante el uso de la correspondiente función disipativa de Rayleigh. Con

$$\overline{S}_{ie} = \frac{\overline{\phi}_R}{T} \quad (7.10)$$

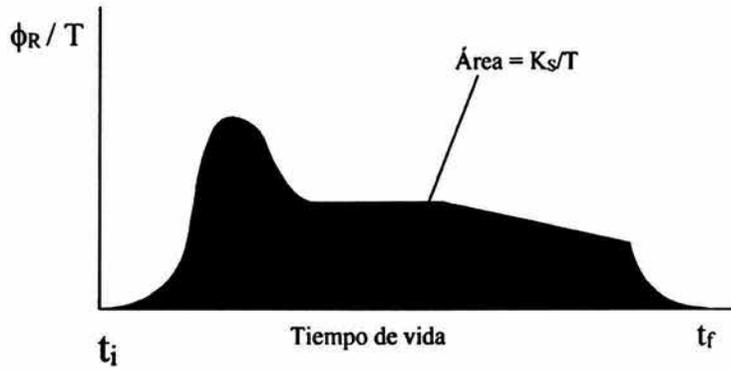


Figura 7-6: Limite máximo a la generación de entropía,  $K_S$  de una estructura disipativa.

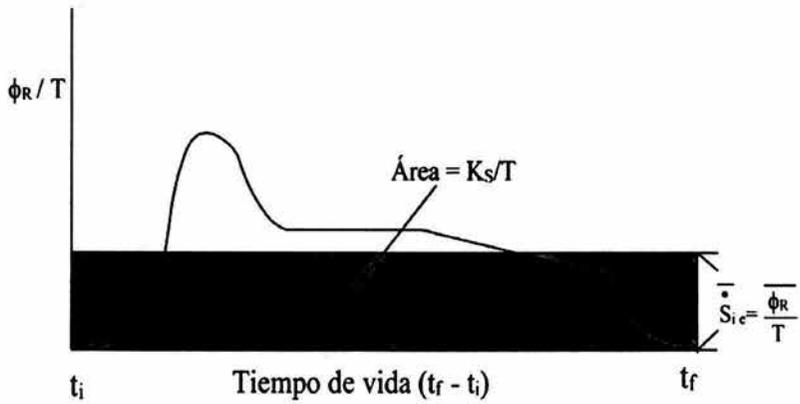


Figura 7-7: Entropía Configuracional

donde  $\overline{\phi}_R$  es la **función disipación de Rayleigh media** de la estructura disipativa, entonces la ec. (7.9) se transforma en

$$\frac{\overline{\phi}_R}{T}(t_f - t_i) = \frac{K_S}{T} \quad (7.11)$$

o

$$(t_f - t_i) = \frac{K_S}{\overline{\phi}_R} \quad (7.12)$$

Estas dos expresiones son válidas para todo sistema disipativo isotérmico. Una muestra de la validez de la ec. (7.12) es que describe los datos experimentales que existen para tiempo vida máxima (TVM) para todas los mamíferos en función de su Tasa Metabólica Especifica (TME) o función disipación de Rayleigh (Véase figura 7-8). De acuerdo a la figura 7-8 la  $K_S$  para los mamíferos es  $K_S = 200$  [kcal/g].

Es decir el tiempo de vida máxima de un mamífero es inversamente proporcional a su tasa metabólica específica o a su función disipación de Rayleigh.

## 7.2. Daño funcional y el funcionamiento remanente porcentual.

Si analizamos algunos de los procesos disipativos que ocurren a nuestro alrededor es fácil observar en plantas, animales y máquinas (por ejemplo automóviles) la existencia de ciclos en el funcionamiento de dichos sistemas. Por ejemplo ciclos diarios en plantas en plantas; ciclos respiratorios en animales, en las reacciones químicas celulares; en los autos en los ciclos del motor...etc.

Con estas ideas en mente la ec. (7.11) se puede escribir,

$$\frac{\overline{\phi}_R \tau}{T} \left[ \frac{t_f - t_i}{\tau} \right] = \frac{K_S}{T} \quad (7.13)$$

donde  $\tau$  es el **tiempo característico del ciclo de operación del sistema**. Si definimos el **número de ciclos funcionales**,  $N_C$  durante el periodo de vida de una estructura disipativa como,  $N_C = (t_f - t_i)/\tau$  y entonces podemos escribir la ec. (7.13).

$$\frac{\overline{\phi}_R \tau}{T} N_C = \overline{S}_{ie} \tau N_C = \frac{K_S}{T} \quad (7.14)$$

donde  $\overline{S}_{ie}$  [W/kg/K] es la rapidez de generación entropía específica media del sistema. Y como todos los sistemas disipativos eventualmente fallan catastróficamente es natural definir una cantidad que refleje el **daño funcional acumulativo** que ocurre durante cada ciclo.

$$\overline{S}_d = \alpha \overline{S}_{ie} \quad (7.15)$$

donde  $\alpha$  es un constante. Si definimos  $\Delta \overline{S}_d = \overline{S}_d \tau$  [J/kg/K] la ec. (7.14) se puede escribir como

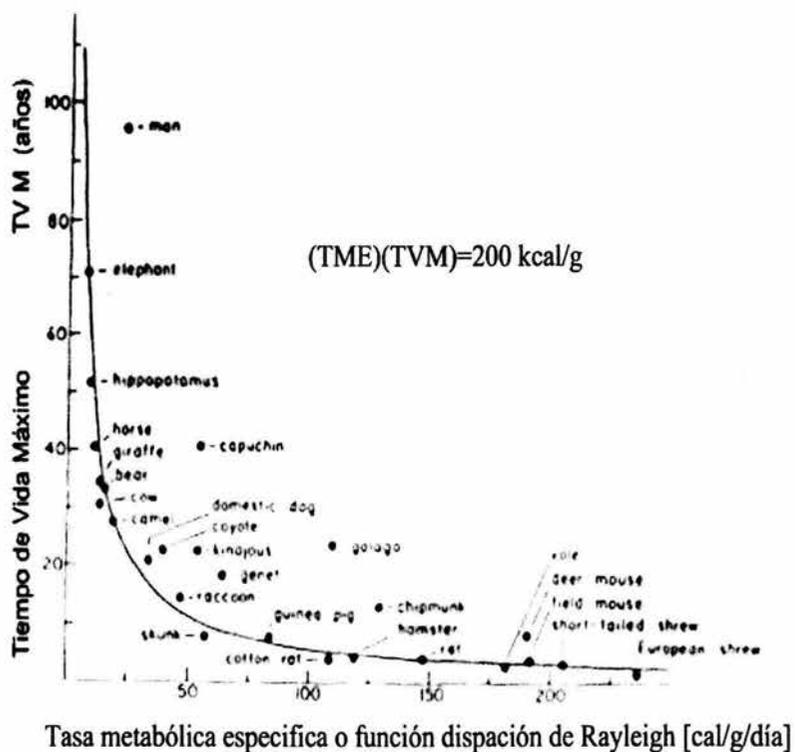


Figura 7-8: Tiempo de vida máxima de varios mamíferos en función de su Tasa Metabólica Específica o función disipación de Rayleigh (Tomada de [1])

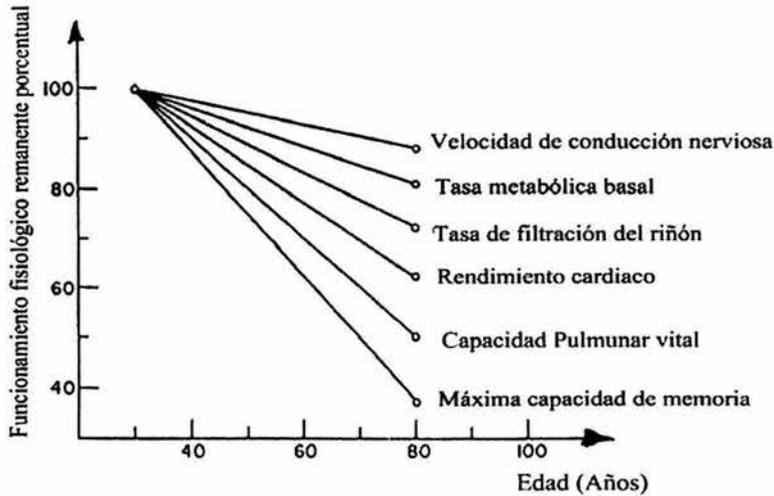


Figura 7-9: Funcionamiento fisiológico remanente porcentual para distintos órganos de un humano. (Tomada de [1])

$$\Delta \bar{S}_d \left[ \frac{t_f - t_i}{\tau} \right] = \Delta \bar{S}_d N_C = \alpha \frac{K_S}{T} \quad (7.16)$$

El significado de esta ecuación es: Que con cada ciclo la máquina acumula un **daño funcional** denotado por  $\Delta \bar{S}_d$  hasta que se alcanza un valor crítico y la máquina falla al no poder obtener energía libre del funcionamiento de la misma. La ec. (7.16) implica que **después de estado estacionario cuando los procesos de envejecimiento son observables**.

$$\dot{S}_{ie}(t) = \bar{S}_{ie} \left[ 1 - \alpha \frac{(t - t_{EE})}{\tau} \right] \quad (7.17)$$

donde  $t_{EE}$  es el tiempo en el que se alcanza el estado estacionario, y podemos definir el **funcionamiento remanente porcentual**,  $\pi_{re}$ , como

$$\pi_{re}(t) \equiv \frac{\dot{S}_{ie}(t)}{\bar{S}_{ie}} \quad (7.18)$$

relativa a los procesos en estado estacionario.

La interpretación de la ec. (7.17) es que después de que una estructura disipativa alcanza

el estado de madurez, la rapidez de generación de entropía específica disminuye en proporción lineal con el aumento en el daño funcional en el sistema, es decir el funcionamiento remanente porcentual de la estructura disipativa disminuye en proporción lineal con el aumento en el daño funcional acumulado por el sistema en cada ciclo funcional. Para el caso particular de los humanos en la figura 7-9 se muestra como con la edad disminuye linealmente el funcionamiento fisiológico remanente porcentual de distintos órganos.

### 7.3. Incremento de la Tasa Metabólica Específica o función disipación de Rayleigh, respecto al mínimo, $\phi_{R\text{mín}}$ , y la duración de la vida.

Supongamos que para una especie de planta o animal o máquina construida por el hombre, analizamos la variación del tiempo de vida respecto a una estructura disipativa que se ha llevado a su máxima duración de vida posible,  $t_{f\text{máx}}$  al tener una función disipación de Rayleigh mínima  $\phi_{R\text{mín}}$ .

Si sustituimos  $\phi_{R\text{mín}}$  en la ec. (7.12) tenemos

$$(t_{f\text{máx}} - t_i) = \frac{K_S}{\phi_{R\text{mín}}} \quad (7.19)$$

y entonces

$$t_{f\text{máx}} = t_i + \frac{TK_S}{\phi_{R\text{mín}}} \quad (7.20)$$

¿Como varia el tiempo de vida pasa si nos alejamos de  $\phi_{R\text{mín}}$ ?, es decir ¿Qué pasa cuando tenemos, un  $\phi_R = \phi_{R\text{mín}}(1 + \alpha)$  donde  $\alpha < 1$ ?. De la ec. (??) vemos que

$$t_f(\phi_R) = t_i + \frac{K_S}{\phi_{R\text{mín}}(1 + \alpha)} \quad (7.21)$$

La cual desarrollando en serie de Taylor  $(1 + \alpha)^{-1} = (1 - \alpha + \dots)$  tenemos que

$$t_f(\phi_R) = t_i + \frac{K_S}{\phi_{R\text{mín}}}(1 - \alpha) \quad (7.22)$$

Está ecuación significa que al alejarnos de la función de disipación mínima en una cantidad  $\alpha$  el tiempo de vida se ve disminuido en la proporción:

$$\alpha \frac{K_S}{\phi_{R\text{mín}}} \quad (7.23)$$

Es decir para alcanzar el máximo de tiempo posible de vida para nuestra especie, debemos **mantener nuestra función disipación de Rayleigh promedio debe mantenerse lo más cerca posible a su valor mínimo.**

¿Qué ocurre cuando en un organismo se presentan simultáneamente varios procesos que tienden al aumento de la tasa metabólica específica ó función disipación de Rayleigh en diversas regiones o subsistemas?

En primera aproximación, si despreciamos la interacción entre los efectos de los incrementos, tendríamos una situación aditiva. Esto es, se sumarían los efectos de cada proceso tendiente a disminuir la duración total de la vida. Es decir, para el caso en que se tengan la acción simultanea de  $n$  diversos agentes o fenómenos que causan un incremento en la Tasa Metabólica Especifica ó función disipación de Rayleigh en diversos subsistemas se tiene que

$$t_f(\phi_R) = t_i + \frac{K_S}{\phi_{R\text{mín}}} \left(1 - \sum_{j=1}^n \alpha_j\right) \quad (7.24)$$

El significado de la ec. (7.24) es el tiempo de vida de un estructura disipativa bajo las suposiciones consideradas antes disminuye en proporción a la suma de los distintos factores,  $\alpha_j$  que aumentan la tasa metabólica específica o la función disipación de Rayleigh.

¿Qué pasa cuando la Tasa Metabólica Especifica o función disipación de Rayleigh en el hombre no es tan pequeña? Se deben de tomar en cuenta los siguientes términos en el desarrollo en series de Taylor en la ec. (7.21).

Los aumentos de la Tasa Metabólica Especifica o función disipación de Rayleigh local en ciertos órganos puede tener diversos orígenes:

1. Los relativos al consumo de alimentos y substancias (aquí el problema puede deberse a excesos de alimentos y bebidas, o bajo consumo de otros).
2. Los relativos respecto a hábitos de trato del cuerpo como costumbres respecto a la cantidad de sueño, respecto al ejercicio corporal, posturas, aseo, etc.
3. Los relativos a los estados emocionales, maniaco-depresivo, estrasamiento, ira-enojo.

El orden en que la humanidad ha ido comprendiendo el efecto negativo que sobre la salud y la duración de la vida tienen los tres tipos de factores mencionados previamente es el orden en que se describen líneas arriba. A nivel de ciencia existe un gran acuerdo sobre el efecto de las causas del tipo 1; sobre las causas del tipo 2 el acuerdo es un poco menor debido a frontera, asuntos y efectos por descubrir; y sobre las causas del tipo 3, el acuerdo es aún menor, pues éste último tipo de causas es sujeto actual de investigación científica y en algunos casos de controversia.

## 7.4. Envejecimiento de una célula

La teoría macroscópica desarrolla para explicar el tiempo de vida de una estructura disipativa en función de la **Tasa Metabólica Especifica** o función disipación de Rayleigh debe en

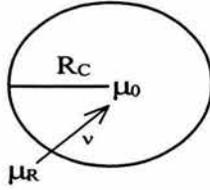


Figura 7-10: Modelo sencillo de una célula

principio ser valido para toda célula viva. Esto, ¿Que implica?

Un modelo muy simplificado de una célula pero suficiente significativo para enter el proceso de envejecimiento de esta. Imaginemos una célula de radio,  $R$ , la cual tiene una diferencia de potencial químico entre el centro de la misma (en la mitocondria) y sus paredes dada por  $\Delta\mu = \mu_R - \mu_0$  (ver figura 7-10). Entonces la fuerza termodinámica viene dada por  $(\Delta\mu/R_c)$  y si los flujos químicos ocurren a una velocidad constante,  $v_c$ .

Entonces la rapidez de generación de entropía de la celula,  $\left(\frac{d_i S}{dt}\right)_c$  está dada por

$$\left(\frac{d_i S}{dt}\right)_c = \frac{1}{T_c} \left[ \left(\frac{\Delta\mu}{R_c}\right) v_c \right] \quad (7.25)$$

donde  $T_c$  es la temperatura media de la célula. Entonces la función disipación de Rayleigh de una célula,  $\phi_{Rc}$  de acuerdo a la ec. (7.5) está dada por

$$\phi_{Rc} = \frac{T_c}{M_c} \left(\frac{d_i S}{dt}\right)_c = \frac{1}{M_c} \left[ \left(\frac{\Delta\mu}{R_c}\right) v_c \right] \quad (7.26)$$

donde  $M_c$  es la masa de la célula. Postulando que el límite a la rapidez de generación de entropía especifica en una célula es  $K_c$  tenemos que

$$\int_{t_i}^{t_f} \frac{1}{M_c} \left(\frac{d_i S}{dt}\right)_c dt = \frac{\bar{\phi}_{Rc}}{T_c} (t_f - t_i) = \frac{K_c}{T_c} \quad (7.27)$$

donde  $\bar{\phi}_{Rc}$  es la función disipación de Rayleigh media de una célula. Multiplicando del lado derecho de la ec. (7.27) por  $(\tau_c/\tau_c)$  y multiplicando ambos lados de la misma ecuación por  $\alpha$ .

$$\alpha \left(\frac{\bar{\phi}_{Rc}}{T_c}\right) \tau_c \frac{(t_f - t_i)}{\tau_c} = \alpha \frac{K_c}{T_c} \quad (7.28)$$

o

$$\Delta \bar{S}_{dc} N_{m\acute{a}x} = \alpha \frac{K_c}{T_c} \quad (7.29)$$

donde  $\Delta\bar{S}_{dc}$  es el término que corresponde al incremento por ciclo en el desorden funcional de la célula,  $N_{m\acute{a}x}$  es el número máximo de ciclos funcionales que realiza una célula.

$$\Delta\bar{S}_{dc} = \alpha \left( \frac{\bar{\phi}_{Rc}}{T_c} \right) \tau_c \quad (7.30)$$

En humanos  $\alpha \cong 10^{-9}$  los ciclos en general ocurren con una duración de 5 segundos, en mamíferos se correlaciona con la entrada de oxígeno (respiración 12 por minuto en humanos).

## 7.5. División de la Tasa Metabólica total de un ser vivo.

En la ec. (7.12) encontramos una relación entre el tiempo de vida de un estructura disipativa su Tasa Metabólica Especifica. Ahora nos hacemos la siguiente pregunta ¿En qué mecanismos o fenómenos hace trabajo la potencia externa suministrada a un ser vivo?, ¿Cómo se divide la tasa metabólica total,  $\dot{\theta}_T$  [W] en un ser vivo?. La tasa de consumo energético de ser vivo o tasa metabólica total se divide de la siguiente manera

$$\dot{\theta}_T = \dot{\theta}_{BMR} + \dot{\theta}_{gs} + \dot{\theta}_s + \dot{\theta}_r + \dot{\theta}_m \quad (7.31)$$

donde  $\dot{\theta}_{BMR}$  es el ritmo metabólico basal o tasa de consumo energía para mantener las funciones vitales del organismo en condiciones de reposo (circulación sanguínea, respiración, digestión, etc.),  $\dot{\theta}_{gs}$  es el ritmo metabólico para el incremento de estructura o tasa de consumo de energía en el incremento de estructura (importante en la infancia, en un adulto es prácticamente cero),  $\dot{\theta}_s$  es la potencia consumida en el servicio o aplicación del sistema o tasa de consumo de energía por unidad de masa en actividades físicas (caminar, nadar, etc),  $\dot{\theta}_r$  es la parte dedicada a reproducción o tasa de consumo de energía en la reproducción,  $\dot{\theta}_m$  es la potencia específica dedicada a mantener la estructura o tasa de consumo de energía empleada en la reparación de estructura (importante durante el sueño). La función reproducción para mamíferos es

$$f_r = \frac{\bar{M}_r \Delta\dot{\theta}_r n_r t_{pl}}{\bar{M} \dot{\theta}_T t_f} \quad (7.32)$$

donde  $\bar{M}$  es la masa de la hembra,  $\bar{M}_r$  es la masa de la placenta y fetos,  $n_r$  es el número de embarazos,  $t_{pl}$  es el tiempo de embarazo + lactancia,  $\dot{\theta}_T$  es el ritmo metabólico total y  $t_f$  es el tiempo máximo de vida.

Otro aspecto importante de nuestro análisis es el siguiente: ¿Qué pasa si a la estructura disipativa se le deja de aplicar potencia externa?. Como sabemos la potencia externa se ocupa en la creación y mantenimiento de la estructura disipativa. Sea  $\psi_{ext}$  la potencia externa suministrada  $\dot{p}_s^+$ , la rapidez de producción de estructura,  $\dot{p}_{ms}$ , la rapidez de mantenimiento de estructura disipativa existente y  $e$  la energía por unidad de masa de la estructura.

$$\psi_{ext} = e(\dot{p}_s^+ + \dot{p}_{ms}) \quad (7.33)$$

imaginemos que el organismo deja de percibir potencia del exterior,  $\psi_{ext} = 0$ , entonces la ec. (7.33) implica que

$$(\dot{p}_s^+ + \dot{p}_{ms}) = 0 \quad (7.34)$$

y como  $\dot{p}_{ms} > 0$ . Ello conduce a que en este caso

$$\dot{p}_{ms} = -\dot{p}_s^+ \quad (7.35)$$

lo cual significa que

$$\dot{p}_s^+ < 0 \quad (7.36)$$

(situación en la que empezamos a digerir o comer nuestra propia estructura para seguir vivos).

## 7.6. Etapas del desarrollo biológico de un ser vivo (una descripción termodinámica).

La idea en esta sección es explicar cualitativamente algunas curvas de biología del desarrollo desde un punto de vista termodinámico. Son bien conocidas las curvas de crecimiento en  $[\text{cm}^2]$  ó  $[\text{kg}]$  y la velocidad de crecimiento en  $[\text{cm}^2/\text{día}]$  ó  $[\text{kg}/\text{día}]$  de un organismo como las que vimos en el capítulo 3. (ver figura 7-11). No obstante un curva de la función disipación de Rayleigh de organismo no es muy conocida, el primero que introdujo esta curva fue Zotin [5], (ver figura 7-3).

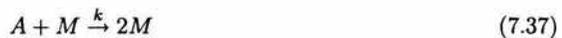
Algo que es bien conocido es que la curvas desarrollo de una población son reproducidas a partir de la ecuación de crecimiento de logístico. En [4] se propone que la ecuación de crecimiento logístico de la población de una especie puede obtener a través de un reacción autocatalítica.

Si tal ecuación es valida para describir el desarrollo de la población de una especie en un ecosistema, debe en esencia valida para describir el desarrollo de un organismo vivo desde huevo hasta su madurez.

### 7.6.1. La ecuación de crecimiento logístico de un organismo y la rapidez de generación de entropía.

En esta subsección se va a derivar la ecuación de crecimiento logístico a partir un reacción autocatalítica.

La ec. de crecimiento de un organismo vivo puede verse como una reacción autocatalítica [4]. De la forma



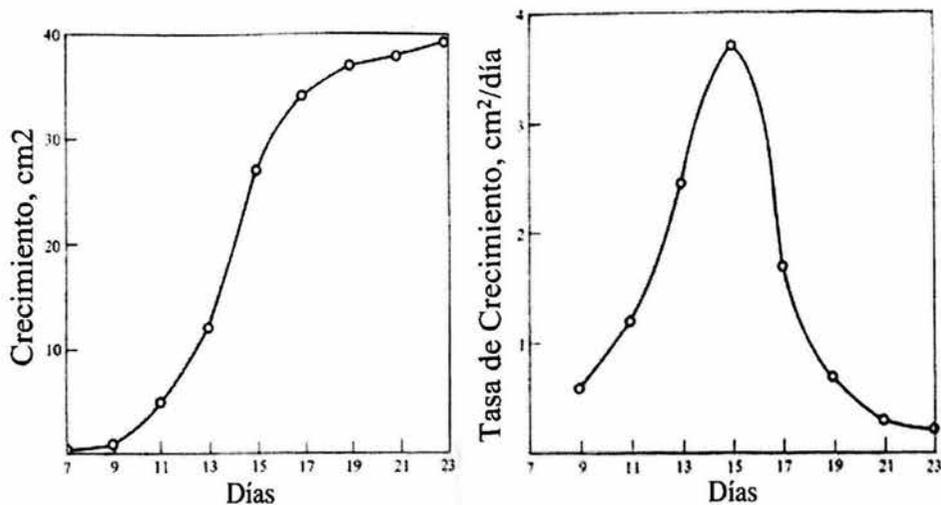


Figura 7-11: Curvas de crecimiento de una planta

$$M \xrightarrow{d} \quad (7.38)$$

donde  $A$  es el alimento o fuente de energía y  $M$  [kg] es la biomasa del ser vivo. Si se supone que en la masa del sistema alimento-organismo vivo en estado estacionario es una constante  $N$ , i. e.

$$A + M = N = \text{cte.} \quad (7.39)$$

donde  $N$  es la cantidad de materia total. Como sabemos del capítulo 2, la velocidad de reacción de la primera reacción (7.37),  $v_1$ , está dada por

$$v_1 = \vec{k}(AM) - \overleftarrow{k}(M)^2 \quad (7.40)$$

suponiendo que  $\vec{k} \gg \overleftarrow{k}$ , entonces tenemos que

$$v_1 \simeq \vec{k}(AM) \quad (7.41)$$

por otro lado la velocidad de reacción de la segunda reacción (7.38),  $v_2$ , está dada por

$$v_2 \simeq \overrightarrow{d}(M) \quad (7.42)$$

De la ec. (2.1) sabemos que el cambio de masa del  $\gamma$ -ésimo componente de un reacción en un

sistema cerrado esta dada por

$$\frac{dm_\gamma}{dt} = M_\gamma \sum_\rho^r \nu_{\gamma\rho} \frac{d\xi_\rho}{dt} \quad (7.43)$$

Por lo tanto la rapidez de creación biomasa  $\dot{M}$  está dada por

$$\begin{aligned} \dot{M} &= 2v_1 - v_1 - v_2 = v_1 - v_2 \\ &= \vec{k}(AM) - \vec{d}(M) \end{aligned} \quad (7.44)$$

sustituyendo la ec. (7.39) en la ec. (7.44) tenemos que

$$\dot{M} = \vec{k} M(N - M) - \vec{d}(M) \quad (7.45)$$

la cual es la famosa ecuación logística de crecimiento de Verhulst [4]. Por otro lado la dinámica de  $A$  está dada por

$$\dot{A} = -v_1 = -\vec{k}(AM) \quad (7.46)$$

El desarrollo de las ecs. (7.41) y (7.42) nos permite calcular la rapidez de generación de entropía como

$$\frac{d_i S}{dt} = \frac{A_1 v_1}{T} + \frac{A_2 v_2}{T} \quad (7.47)$$

donde las afinidades están dadas por

$$A_1 = RT \log(v_1) \quad A_2 = RT \log(v_2) \quad (7.48)$$

Por lo que tenemos la rapidez de generación de entropía para un organismo vivo está dada por

$$\frac{d_i S}{dt} = R \log \left[ \vec{k} M(t)(N(t) - M(t)) \right] + R \log \left[ \vec{d}(M(t)) \right] \quad (7.49)$$

Utilizando Matlab 6.5/Simulink se simularon las ecs. (7.45) y (7.49) con los siguientes parámetros,  $N = 70$ ,  $M = 0,001$  kg ( masa inicial),  $k = 0,01$ ,  $d = 0,05$ , obteniendo tres curvas de desarrollo biológico (Producción de biomasa, Rapidez de producción de biomasa, y Rapidez de producción de entropía) que se muestran en la figura 7-12 (lineas continuas). De tales simulaciones se puede observar que la ecuación logística no considera el envejecimiento por lo tanto representa un modelo ideal del desarrollo de un sistema biológico. No obstante es muy ilustrativo para generar las curvas de desarrollo biológico. Otra cosa que es sorprendente es que através de la curva de producción de entropía se muestra claramente como esta alcanza un valor mínimo cuando el sistema llega a un estado estacionario.

Aprovechando la curvas generadas por la ecuación logística, en ellas se dibuja una linea del posible comportamiento real de estas curvas contemplando la etapa de envejecimiento en base a la teoría desarrollada en la sección 7.3. En la curva (a) de la fig. 7-12 se muestra como en la

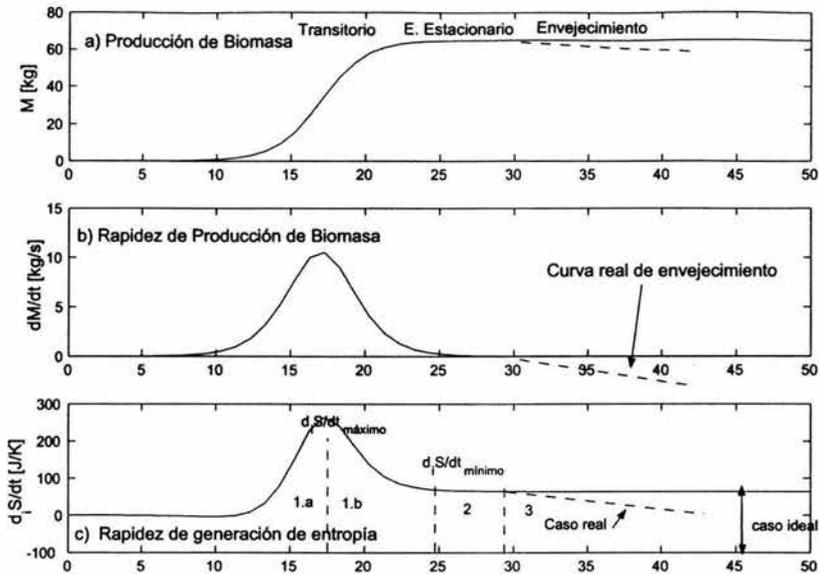


Figura 7-12: Curvas de desarrollo biológico ( Línea continua-simulaciones, Línea a tramos-caso real )

etapa de envejecimiento de un estructura biológica disipativa, su masa se va reducir. En la curva (b) de la fig. 7-12 se muestra como en la etapa de envejecimiento de un estructura biológica disipativa existe destrucción de estructura biológica. En la curva (c) de la fig. 7-12 se muestra cómo en la etapa de envejecimiento de estructura biológica disipativa la producción de entropía disminuye linealmente. Esto está en concordancia con datos experimentales ver figura 7-4 para el caso de humanos y ver las figura 7-3 para el caso de un ratón.

NOTA: Los parámetros escogidos para la simulación fueron arbitrarios, por lo que las curvas obtenidas en realidad no representan la curva real de un organismo biológico, el fin de estas curvas es ilustrar los conceptos y la teoría aquí desarrollada. Sin embargo estas curvas tienen la forma de curvas experimentales de desarrollo de un organismo vivo.

### Etapas de desarrollo ser vivo (una descripción termodinámica):

Las curvas de desarrollo biológico mostradas en la figura 7-12 permiten identificar tres etapas básicas en el desarrollo de un organismo vivo que se enlistan a continuación.

#### 1. Etapa transitoria

La etapa transitoria es la etapa antes que el ser vivo llega a su madurez o estado estacionario. Esta etapa esta dividida en tres subregiones:

- a) Crecimiento exponencial en peso respecto al tiempo.-Para el caso de un ser humano esta comprende desde la fertilización hasta la etapa que un bebé nace. Durante esta etapa hay un aumento en la rapidez de generación de entropía. En esta etapa la velocidad de creación de estructura es mucho mayor que la velocidad de destrucción de ésta. En esta etapa ocurre una máxima disipación de potencia externa suministrada para la creación de orden estructural y funcional. (región 1.a en la fig. 7-12)
- b) Etapa de aumento sigmoidal en la rapidez de generación de Entropía. En el humano, esta etapa comprende el período que existe entre el nacimiento y el punto máximo valor de generación de entropía el cual ocurre aproximadamente a dos años y medio de edad. En este período el porcentaje total del ritmo metabólico utilizado por el cerebro es de alrededor del 40 o 50 %. Alrededor de los dos años y medio termina el 95 % del crecimiento en peso del cerebro y ocurre una reorganización de las funciones cerebrales definiéndose su actividad por zonas con lo cual ocurre una disminución abrupta del metabolismo cerebral.

Esto podría estar conectado con el hecho de que en esta etapa nuestro cerebro adquiere una capacidad para lograr un objetivo con el mínimo de esfuerzo. Es decir se dan una definición de las zonas del cerebro.

- c) Regulación o disminución en la rapidez de crecimiento. A partir de la etapa de máxima razón de crecimiento sigue una etapa en la que la rapidez de crecimiento neto disminuye de manera exponencial hasta que llega a ser cero en el estado de madurez (estado estacionario). ( ver región 1.b fig. 7-12)

Mientras la rapidez de producción de entropía alcanza un mínimo, está conectado con el hecho de que el ser vivo alcanza el estado estacionario en edad adulta. Esto explica la evolución de un ser vivo hasta alcanzar un estado de máxima eficiencia termodinámica.

En realidad el transitorio del ser vivo puede ser pensado como un proceso de regulación en el cual el sistema consume fuentes de recursos para organizarse y una vez organizado evoluciona a un estado de mínima disipación de entropía.

## 2. Estado estacionario

En estado estacionario la rapidez de crecimiento neto es cero, y la producción de entropía es mínima.

## 3. Colapso del sistema

En esencia el estado estacionario alcanzado no puede permanecer por tiempo infinito ya que en el sistema, el ser vivo, en su estructura más básica que es la célula, hay un inherente proceso de aumento de entropía configuracional, que eventualmente lo lleva al colapso funcional, llamado muerte.

## 7.7. Efecto de la radiación $\gamma$ de Cobalto 60 sobre semillas en la germinación y crecimiento posterior.

Cuando una planta está en etapa de crecimiento (lo cual se puede ver en la figura 7-12 ) se cumple la siguiente relación:

$$\dot{h}^+ = a\dot{\theta} \quad (7.50)$$

donde  $\dot{\theta}$  es el ritmo metabólico de la planta,  $a$  es una constante de la planta, y  $\dot{h}^+$  es la rapidez de crecimiento de la planta.

Si consideramos un valor medio del ritmo metabólico,  $\dot{\theta}(t) = \bar{\theta}$ , entonces la ec. (7.50) se puede integrar, así la altura de la planta es,

$$h = \int \dot{h}^+ dt = a \int \dot{\theta} dt = a\bar{\theta}(t_f - t_i) \quad (7.51)$$

Por otro lado como se espera que el efecto de la radicación gama no promueva el desarrollo de la planta; entonces  $h$  será proporcional al factor  $(1 - d_{r\gamma})$ ; donde  $d_{r\gamma}$  es la dosis en rad de rayos gama del cobalto 60 recibida por las semillas de ajonjolí. También será proporcional al tiempo transcurrido desde que se plantó la semilla de ajonjolí. Entonces

$$h = \beta(t_f - t_i)(1 - d_{r\gamma}) \quad (7.52)$$

De las ecuaciones (7.51) y (7.52)

$$\bar{\theta} = \frac{\beta}{a}(1 - d_{r\gamma}) \quad (7.53)$$

La manera más directa de determinar  $\beta/a$ , es la siguiente. Para el caso de ausencia de radiación  $\bar{\theta}$  debe valer  $\bar{\theta}_0$ , el cual es el valor de  $\bar{\theta}$  en ausencia de radiación.

$$\frac{\beta}{a} = \dot{\theta}_0 \quad (7.54)$$

Con este resultado la ec. (7.53) aparece de la siguiente manera,

$$\bar{\theta} = \bar{\theta}_0(1 - d_{r\gamma}) \quad (7.55)$$

y la ec. (7.52) se puede escribir

$$h = a\dot{\theta}_0(t_f - t_i)(1 - d_{r\gamma}) \quad (7.56)$$

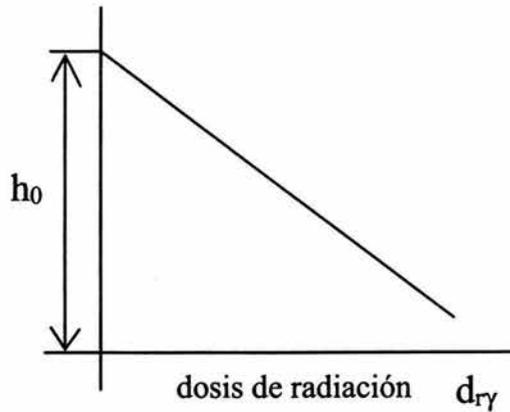


Figura 7-13: Efecto de radiación en semillas

Si,  $(t_f - t_i) = cte$  (período transcurrido desde el día de siembra),

$$h_0 = a\dot{\theta}_0(t_f - t_i) \quad (7.57)$$

donde  $h_0$  es la altura de la planta en un periodo transcurrido sin que a la semilla se le irradie.

$$h = h_0(1 - d_{r\gamma}) \quad (7.58)$$

Es decir la altura de la planta a tantos días de sembradas, disminuye linealmente con la dosis de radiación aplicada a la semilla antes de sembrarla (ver figura 7-13)

Estos resultados concuerdan muy bien con los datos experimentales realizados por Alvarez y Robles [7], donde evaluaron el efecto de radiación en las semillas de ajonjolí (ver figura 7-14). De donde se ve que al aumentar la dosis de radiación la semilla a 31 días de su siembra la altura de la planta era menor en proporción a la dosis de radiación aplicada a la semilla.

## 7.8. Tiempo de vida hojas de plantas.

Otros datos experimentales que validan la teoría desarrollada de tiempo de vida de estructuras disipativas es el tiempo de vida de las hojas de las plantas en función de su metabolismo.

Del análisis de 280 especies de plantas de dos conjuntos de datos globales [8], encontraron que la ganancia potencial de carbono (fotosíntesis) y la pérdida de carbono (respiración), la fotosíntesis neta se incrementa en proporción similar con el decremento del periodo de vida de la hoja, el incremento de concentración de nitrógeno en la hoja, incremento en el área

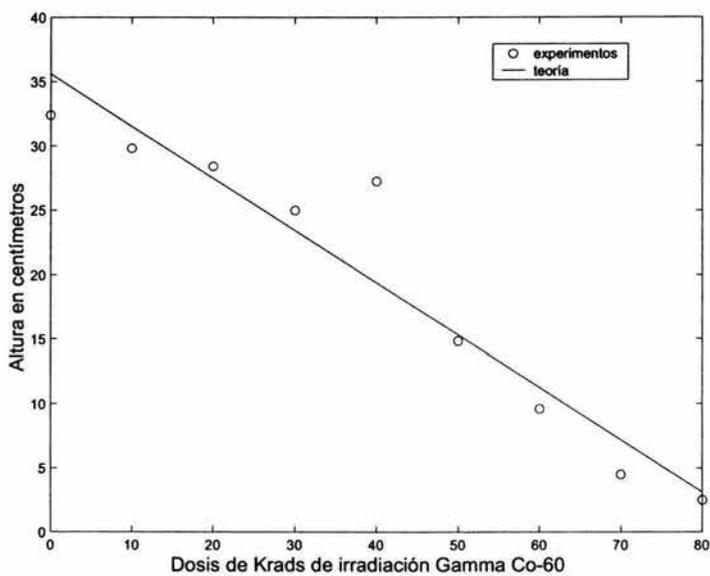


Figura 7-14: Experimentos de efectos de radiación semillas de condolí

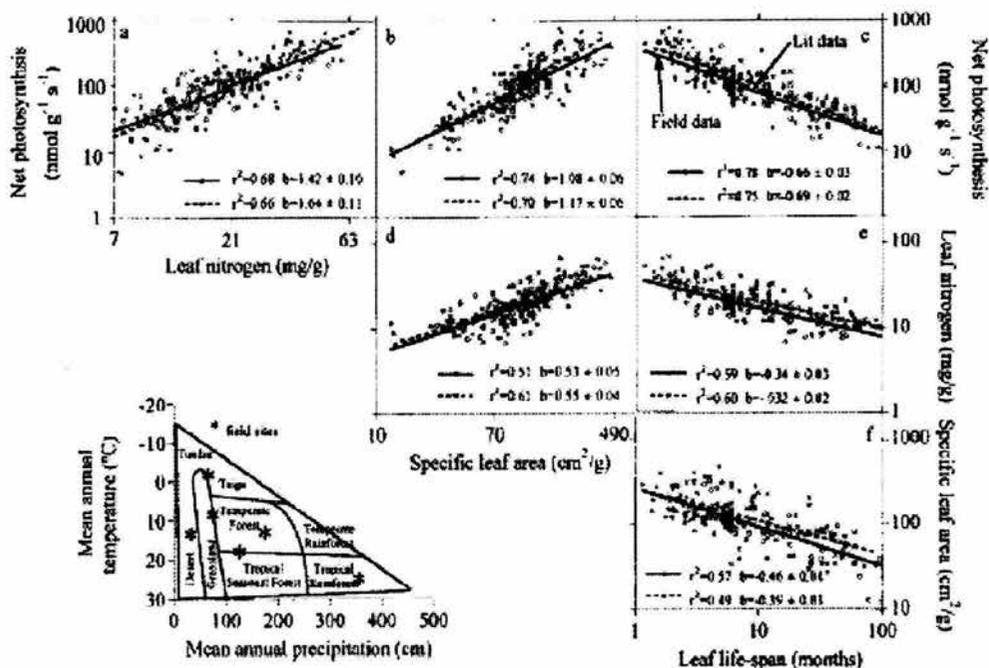


Figura 7-15: Periodo de vida de hojas en tasa metabólica específica (Fotosíntesis Neta). (Tomada de [8])

específica de la hoja. Es decir el tiempo de vida de las hojas es inversamente proporcional a su metabolismo.

$$(t_i - t_f)_{hoja} = \frac{K_{hoja}}{\dot{\theta}_{hoja}} = \frac{K_{hoja}}{\alpha A_{shoja}} \quad (7.59)$$

y por otro lado la velocidad de crecimiento

$$\dot{h}^+_{hoja} = \alpha \dot{\theta} = \beta A_{shoja} \quad (7.60)$$

donde  $A_{shoja} = (A_{hoja}/V_{hoja})$  es el área específica de la hoja con  $A_{hoja}$  el área superficial de la hoja y  $V_{hoja}$  el volumen de la hoja (ver figura 7-15).

El intervalo de vida en las plantas es muy amplio, va desde árboles que duran siglos a plantas que duran sólo algunas semanas. No obstante a través del ciclo de vida de una planta hay una alta tasa de muerte celular. Mucha de la masa de la madera es tejido vascular muerto.

Igualmente las hojas de las plantas tienen períodos de vida variables y varía de especie a especie. El síndrome de senescencia en las hojas se nota con la pérdida de clorofila.[9]. El envejecimiento está asociado a reacciones oxidativas peligrosas, que en términos físicos se refiere a un aumento en la entropía configuracional.

## 7.9. Modelo fenomenológico de un ecosistema

### 7.9.1. Metabolismo específico promedio de un ecosistema

Imaginemos un ecosistema formado por una gran cantidad de plantas de diferentes especies las cuales conviven entre sí, y también lo hacen con diversas especies de animales, descompositores como bacterias y hongos.

Sabemos que cada animal, planta, hongo, por aparte son un sistema autoorganizado con carácter disipativo (del punto de vista de la termodinámica de procesos irreversibles). Esto significa que les debe llegar energía libre de otro sistema para la realización de sus funciones vitales básicas. En última instancia la fuente por excelencia de energía libre en un ecosistema complejo es la radiación solar. La descripción de tal ecosistema se puede llevar a cabo en distintos niveles y poniendo atención en los diversos aspectos biológicos, químicos y físicos.

En esta sección vamos a analizar un ecosistema en el marco general de la termodinámica de procesos irreversibles. Por supuesto llevaremos a cabo un conjunto de ecuaciones simplificadas, las cuales nos permiten un análisis lo más sencillo pero significativo posible, que nos permita describir la curvas de evolución de un ecosistema.

Un organismo animal puede describirse a través de su **Tasa Metabólica Específica** (TME), en cuanto potencia disipada o generación de entropía por unidad de masa se refiere [1]. De igual manera podemos describir una planta o cualquier otro organismo vivo a través de su TME, vease trabajo de Sverizhev capítulo anterior.

En el marco teórico anterior, podemos ver que si observamos con cuidado un ecosistema, lo podemos describir a través de su tasa metabólica específica promedio del ecosistema en su conjunto  $\dot{\theta}$  [W/kg] o [J/Kg/s], expresado en unidades de energía disipada por unidad de tiempo y unidad de masa. Como parece existir un consenso, cualitativo, acerca de que la estabilidad de un ecosistema depende del tamaño y del número de especies diferentes que lo conforman podemos afirmar que  $\dot{\theta}$ , es función de la masa total,  $M$  [kg], del ecosistema y del tiempo ( $t$ ), que ha transcurrido a partir del comienzo del ecosistema como tal.

En otras palabras

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}(M, t) \quad (7.61)$$

La ec. (7.61) significa que

$$\frac{d\dot{\theta}}{dt} = \left( \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial M} \right)_t \frac{dM}{dt} + \left( \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial t} \right)_M \quad (7.62)$$

Mediante la identidad matemática

$$\left(\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial t}\right)_M = -\left(\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial M}\right)_t \left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)_\dot{\theta} \quad (7.63)$$

la ec. (7.62) puede escribirse como,

$$\begin{aligned} \frac{d\dot{\theta}}{dt} &= \left(\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial M}\right)_t \frac{dM}{dt} - \left(\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial M}\right)_t \left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)_\dot{\theta} \\ \frac{d\dot{\theta}}{dt} &= -\left(\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial M}\right)_t \left[ \left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)_\dot{\theta} - \frac{dM}{dt} \right] \end{aligned} \quad (7.64)$$

Cuando el ecosistema tiene un buen tiempo de existencia eventualmente llega a un estado estacionario (EE), en el cual  $\dot{\theta}$  tiene un valor constante ( $\dot{\theta}_{EE} = cte$ ). Esto implica que la ec. (7.64) se transforma en

$$\frac{d\dot{\theta}_{EE}}{dt} = 0 \quad (7.65)$$

O en otras palabras: Como en general  $\left(\partial \dot{\theta} / \partial M\right)_t \neq 0$ , entonces en estado estacionario

$$\left(\left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)_\dot{\theta}\right)_{EE} - \left(\frac{dM}{dt}\right)_{EE} = 0 \quad (7.66)$$

Por otro lado, regresando a la ec. (7.62) tenemos varios casos por analizar (casos límites en cuanto a valores de los coeficientes  $\left(\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial M}\right)_t$  y  $\left(\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial t}\right)_M$ .

Imaginemos el caso en que en una región grande de un bosque un incendio redujo a cenizas la vegetación. Entonces es claro que en la ec. (7.62) predominara el término correspondiente a la producción de estructura en esa región del bosque. ¿Cómo identificar cuáles de los dos términos se refieren a la producción de estructura dispativa?

Si  $\dot{\theta}$  aumenta, también lo hace  $\frac{d\dot{\theta}}{dt}$ . En este caso  $\left(\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial t}\right)_M$  no puede ser un término de producción de estructura por cuanto con la condición de que  $M$  sea constante  $\left(\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial t}\right)$  solo puede disminuir. Entonces el término  $\left(\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial t}\right)_M$  debe ser el de destrucción de estructura. Entonces podemos definir un coeficiente de aumento de metabolismo,  $\rho_\theta$ , y coeficiente de rapidez de disminución metabólica,  $\delta_\theta$ , dadas según la siguientes expresiones

$$\rho_\theta \equiv \left(\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial M}\right)_t \quad (7.67a)$$

$$\delta_\theta \equiv -\left(\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial t}\right)_M \quad (7.67b)$$

con lo cual la ec. (7.62) aparece como sigue

$$\frac{d\dot{\theta}}{dt} = \rho_{\theta} \frac{dM}{dt} - \delta_{\theta} \quad (7.68)$$

En estado estacionario, la ecuación anterior afirma que entonces existe un equilibrio dinámico entre los procesos de aumento del metabolismo y disminución. Cuando el término de aumento del metabolismo es mucho mayor que el segundo tenemos producción neta de estructura; cuando el término de rapidez de disminución metabólica predomina, resulta que tenemos una disminución neta en la masa total del sistema.

Volviendo al caso del bosque con un sector grande quemado; en el esquema de la ec. (7.68) tenemos que : durante la primera etapa de restauración el primer término será mucho más grande que el segundo. En este caso tenemos

$$\frac{d\dot{\theta}}{dt} = \rho_{\theta} \frac{dM}{dt} \quad (7.69)$$

Si consideramos que  $\rho_{\theta} = cte = \alpha$ , entonces la ec. (7.69) se transforma en  $d\dot{\theta} = \alpha dM$ , la cual a su vez integrada queda como

$$\dot{\theta} - \dot{\theta}_0 = \alpha(M - M_0) \quad (7.70)$$

Esta ecuación se puede escribir de otra manera, si tomamos en cuenta que una primera aproximación para tiempos pequeños en esa zona inicialmente quemada, del bosque predominan la dinámica de los procesos vegetales sobre los procesos animales. Para esta situación la vegetación crecerá, en el tiempo, en proporción lineal a la masa vegetal del día anterior. Ello se debe a que el área capaz de fotosíntesis, es la que capta la energía libre para producir crecimiento vegetal. Si en esta primera etapa se puede despreciar la fracción masa vegetal que sirve de soporte a las hojas de las plantas frente la masa de las hojas. Entonces

$$\frac{dM}{dt} = \beta M \quad (7.71)$$

donde  $\beta > 0$  es la razón de crecimiento.

Con lo cual la ec. (7.71) da lugar a una expresión de la forma

$$M = M_0 e^{+\beta(t-t_0)} \quad (7.72)$$

Al sustituir la ec. (7.72) en en la ec. (7.70) obtenemos

$$\dot{\theta} - \dot{\theta}_0 = \alpha M_0 (e^{+\beta(t-t_0)} - 1) \quad (7.73)$$

Tanto la expresión (7.72) como la (7.73) análogamente, tienen la misma estructura matemática de la masa y el ritmo metabólico del feto humano a través del tiempo. (Ver figura 7-16)

Por otro lado, para el caso en que el término de disminución metabólica, en la ec. (7.68),

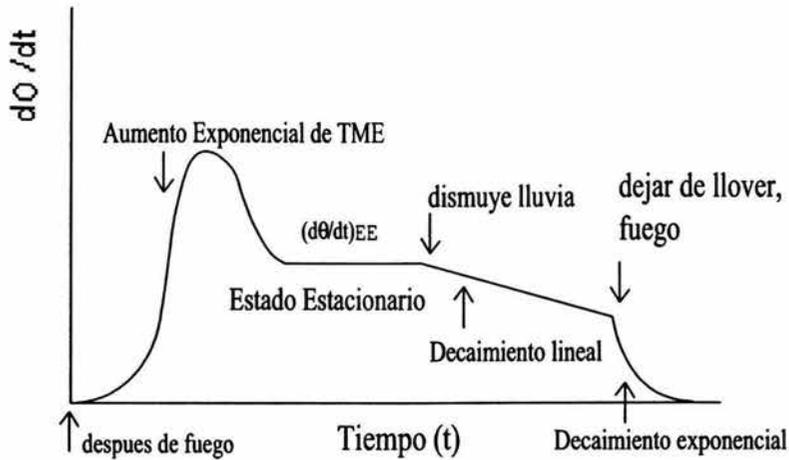


Figura 7-16: Tasa Metabólica específica promedio de un ecosistema a través de su evolución

predomine sobre el aumento metabólico, tenemos dos regímenes; uno para el caso de cambios pequeños y otro para cambios grandes. Entonces para el primer régimen en el cual se considera que  $\delta_\theta$  es una constante; tenemos

$$\frac{d\dot{\theta}}{dt} = -\delta_\theta \quad (7.74)$$

o  $d\dot{\theta} = -\delta_\theta dt$  de la cual por integración obtenemos

$$\dot{\theta} - \dot{\theta}_{EE} = -\delta_\theta(t - t_{EE}) \quad (7.75)$$

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_{EE} - \delta_\theta(t - t_{EE}) \quad (7.76)$$

La ecuación (7.76) tiene la misma estructura matemática que tiene el metabolismo humano contra el tiempo cuando comienza a disminuir linealmente con el tiempo a partir de valor de estado estacionario (ver figura 7-16). Para el caso del bosque o cultivo del que hemos hablado significa lo que le pasa a un bosque cuando se encuentra en un medio ambiente en el cual año con año precipita paulativamente cada vez menos lluvia. Esto pudo haber pasado hace 8 a 10 millones de años, se fue formando la cordillera en Etiopía que dio lugar a la formación de llanuras donde fue surgiendo la evolución de los monos que dió lugar a la formación de la especie humana.

Para el siguiente régimen cuando  $\left(\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial M}\right)_t \ll \left(\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial t}\right)_M$  tenemos que

$$\left(\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial t}\right)_M = -\frac{\dot{\theta} - \dot{\theta}_{EE}}{\tau_{rel}} \quad (7.77)$$

con lo cual la ec. (7.62) se reduce a

$$\frac{d\dot{\theta}}{dt} = -\frac{\dot{\theta} - \dot{\theta}_{EE}}{\tau_{rel}} \quad (7.78)$$

en la aproximación del tiempo de relajación. Integrando entre  $t_0$  y  $t$ , tendríamos

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_{EE} \left[1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_{rel}}}\right] + \theta(t_0) e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_{rel}}} \quad (7.79)$$

La cual correspondería a un cultivo que no se regara (en una zona arida); ó en una maceta, en proceso de muerte por sequía. Lo mismo sucedería si por cualquier motivo se disminuyeran las actividades de fotosíntesis; como por ejemplo durante un invierno nuclear, producto de una guerra nuclear global. (Ver figura 7-16)

### 7.9.2. Modelo mecanístico de un ecosistema

Lo que se desarrolló en la subsección anterior corresponde a una visión global del sistema. Si lo viéramos a nivel mecanicista por tipo de plantas, tipos de animales, tipos de hongos, tipos de descompostores, etc. así como el número de cada uno de ellos tendríamos la siguiente situación:

Desde este punto de vista mecanístico o de detalle tenemos que la TME del ecosistema ( $\dot{\theta}$ ), puede expresarse a través de la siguiente relación funcional (consideramos sólo plantas y animales, pero se puede extender ningún problema a hongos, descompostores, bacterias)

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}(n_{p1}, \dots, n_{pr}, n_{a1}, \dots, n_{at}) \quad (7.80)$$

donde  $n_{pi}$  corre como el número de plantas de la especie  $i$  (y denota su número); y  $n_{aj}$  es el número de animales de la especie  $j$  y así hasta abarcar todos los tipos de plantas y animales del ecosistema.

Si describimos la función de distribución correspondiente a  $(n_{p1}, \dots, n_{pr}, n_{a1}, \dots, n_{at})$  por un solo vector  $(r + t)$  dimensional idénticamente definido como el vector de estructura poblacional del ecosistema  $\vec{n}$ , definido como:

$$\vec{n} = (n_{p1}, \dots, n_{pr}, n_{a1}, \dots, n_{at}) \quad (7.81)$$

Entonces con el uso de la definición dada por la expresión (7.81) la dependencia funcional

expresada por la ec. (7.80) aparece como

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}(\vec{n}) \quad (7.82)$$

y como el valor experimental o fenomenológico,  $\dot{\theta}(M, t)$  en un principio debe ser igual al valor de  $\dot{\theta}$  expresado en términos del número de plantas de todas especies existentes dentro el ecosistema y del número de animales de toda y cada una de las especies dentro del ecosistema. Entonces de la ec. (7.61) y la ec. (7.82) tenemos que

$$\dot{\theta}(M, t) = \dot{\theta}(\vec{n}) \quad (7.83)$$

Como esta igualdad se cumple para todo conjunto de valores reales de  $\vec{n}$ ,  $M$  y  $t$ ; entonces

$$\vec{n} = \vec{n}(M, t) \quad (7.84)$$

Ello implica

$$\frac{d\vec{n}}{dt} = \left(\frac{\partial \vec{n}}{\partial M}\right)_t \frac{dM}{dt} + \left(\frac{\partial \vec{n}}{\partial t}\right)_M \quad (7.85)$$

Mediante la utilización de la siguiente identidad matemática

$$\left(\frac{\partial \vec{n}}{\partial t}\right)_M = -\left(\frac{\partial \vec{n}}{\partial M}\right)_t \left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)_{\vec{n}} \quad (7.86)$$

al sustituirla en la ec. (7.85)

$$\frac{d\vec{n}}{dt} = \left(\frac{\partial \vec{n}}{\partial M}\right)_t \left[ \left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)_{\vec{n}} - \frac{dM}{dt} \right]_M \quad (7.87)$$

De la ec. (7.83) y de la ec. (7.66)

$$\left(\frac{dM}{dt}\right)_{EE} = \left(\left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)_{\dot{\theta}}\right)_{EE} = \left(\left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)_{\vec{n}}\right)_{EE} \quad (7.88)$$

Entonces para estado estacionario cuanto  $\dot{\theta}_{EE} = cte$ , por la ec. (7.66)

$$\left(\frac{d\vec{n}}{dt}\right)_{EE} = \vec{0} \quad (7.89)$$

El significado de ésta ecuación es que el vector  $\vec{n}$  el cual se define la función de distribución de poblaciones animales y vegetales del ecosistema en un vector constante durante estado estacionario

Esto pasa para componente  $i$  de  $\vec{n}$  en estado estacionario, de acuerdo con la ec. (7.89) tenemos

$$\frac{\partial n_i}{\partial n_1} \dot{n}_1 + \dots + \frac{\partial n_i}{\partial n_j} \dot{n}_j + \dots + \frac{\partial n_i}{\partial n_z} \dot{n}_z + \frac{\partial n_i}{\partial t} = 0 \quad (7.90)$$

donde  $i \neq j$ . Y por supuesto  $n_i$  o  $n_j$  al igual que  $n_z$ , abarcan el subconjunto del vector  $\vec{n}$  que corresponde a las especies vegetales, y animales.

Esta es una ecuación de continuidad, existen tantas especies de animales y vegetales distintas que convivan formando parte del ecosistema. La interpretación de cualquiera de estas ecuaciones de continuidad para estado estacionario es la siguiente: cuando el número de  $n_i$  respecto a su valor de estado estacionario para cada  $n_i$  son el resultado de un equilibrio dinámico entre la tendencia a construir estructura biológica y la tendencia a destruirla o asimilarla por los depredadores de la especie correspondiente.

Es claro que en los estados estacionarios de estos ecosistemas no son de duración infinita debido a que en realidad todas las especies están cambiando a través del tiempo. Esta evolución de las especies claramente no se da en el vacío, sino en la constante de interacción con los elementos vegetales y animales del ecosistema del que forma parte. En una primera aproximación las ecuaciones del tipo de la ec. (7.90) son las adecuadas para describir los acoplamientos entre las distintas especies. Esta evolución se manifiesta en cambios en los coeficientes  $\frac{\partial n_i}{\partial n_j} \dot{n}_j$  ( $i \neq j$ ). En este esquema remarcamos no se puede entender la evolución de ninguna especie sin considerar el entorno en donde ha evolucionado, en interacción con múltiples especies vegetales y animales.

Para dos especies en un ecosistema las ecuaciones la función distribución de población es  $\vec{n} = \vec{n}(n_1, n_2)$  y tal caso las ecuaciones de continuidad son

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_1}{\partial n_2} \dot{n}_2 + \frac{\partial n_1}{\partial t} &= 0 \\ \frac{\partial n_2}{\partial n_1} \dot{n}_1 + \frac{\partial n_2}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \quad (7.91)$$

Una manera de destacar los aspectos termodinámicos del análisis anterior es tomar en cuenta que implícitamente al hablar de  $\dot{\theta}$ , estamos hablando de la rapidez de generación de entropía del ecosistema por unidad de masa.

En particular con el uso de las ecs. (7.61) y (7.80) tenemos que

$$M\dot{\theta} = \sum_{i=1}^r m_{p_i} n_{p_i} \dot{\theta}_{p_i} + \sum_{j=1}^t m_{a_j} n_{a_j} \dot{\theta}_{a_j} \quad (7.92)$$

donde  $\dot{\theta}_{p_i}$  es la energía disipada promedio por unidad de masa y de tiempo por un elemento de la especie  $i$  de plantas; y  $\dot{\theta}_{a_j}$  en lo correspondiente para un elemento de la especie animal  $j$ . Y en donde por supuesto  $m_{p_i}$  y  $m_{p_j}$  son respectivamente las masas promedio de un elemento de la especie  $i$  de las plantas y un elemento de la especie  $j$  de los animales.

La masa total del ecosistema  $M$  es obviamente es la suma de las masas de la parte vegetal,

así como la animal del mismo. En lenguaje matemático.

$$M = \sum_{i=1}^r m_{pi} n_{pi} + \sum_{j=1}^t m_{aj} n_{aj} \quad (7.93)$$

con las ecuaciones (7.92) y (7.93) podemos expresar la TME [W/kg] promedio del ecosistema como sigue,

$$\dot{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^r m_{pi} n_{pi} \dot{\theta}_{pi} + \sum_{j=1}^t m_{aj} n_{aj} \dot{\theta}_{aj}}{\sum_{i=1}^r m_{pi} n_{pi} + \sum_{j=1}^t m_{aj} n_{aj}} \quad (7.94)$$

y de acuerdo a la ec. (7.5) la rapidez de generación de entropía promedio de un ecosistema es

$$\frac{d_i S_T}{dt} = \frac{M \dot{\theta}}{T} = \left[ \sum_{i=1}^r n_{pi} \left( \frac{m_{pi} \dot{\theta}_{pi}}{T} \right) + \sum_{j=1}^t n_{aj} \left( \frac{m_{aj} \dot{\theta}}{T} \right) \right] \quad (7.95)$$

Si definimos

$$\frac{dS_{pi}}{dt} = \dot{S}_{pi} = \frac{m_{pi} \dot{\theta}_{pi}}{T} \quad (7.96a)$$

$$\frac{dS_{ai}}{dt} = \dot{S}_{ai} = \frac{m_{ai} \dot{\theta}_{ai}}{T} \quad (7.96b)$$

Con estas definiciones la ec. (7.95) aparece como

$$\frac{d_i S_T}{dt} = \dot{S}_{iT} = \sum_{i=1}^r n_{pi} \dot{S}_{pi} + \sum_{j=1}^t n_{aj} \dot{S}_{aj} \quad (7.97)$$

Es decir la generación de entropía interna total de un ecosistema puede verse en función del Tasa Metabólica Especifica o función disipación de Rayleigh de cada una las especies que lo forman.

## 7.10. Modelo termodinámico de un ecosistema

Otro acercamiento más mecanístico para modelar un ecosistema, es establecer las ecuaciones de balance de materia y energía, y flujos de entropía, de todos sus componentes, para poder evaluar su productividad y sustentabilidad. Desde este marco teórico podemos ver al ecosistema como red de subsistemas interconectados intercambiando tanto energía como materia. Sin pérdida de generalidad podemos considerar al conjunto de todas las especies de plantas en un solo subsistema llamado plantas y análogamente para los animales, hongos y demás componentes de un ecosistema.

Consideremos un ecosistema formado por cinco subsistemas bióticos: plantas; hongos; animales (herbívoros-carnívoros); descompostores; y bacterias fijadoras de nitrógeno. Y dos sub-

sistemas abióticos: el suelo y la atmósfera.

### 7.10.1. Área de estudio de un ecosistema

Si consideramos que tenemos un área de un ecosistema,  $A_e$ , en la cual,  $N_P$ , plantas están uniformemente distribuidas, entonces la densidad superficial de plantas,  $\rho_P$ , está dada por

$$\rho_P = \frac{N_P}{A_e} \quad (7.98)$$

Así el área por planta es

$$\frac{A_e}{N_P} = \frac{1}{\rho_P} \quad (7.99)$$

de donde obtenemos que la distancia entre plantas es

$$d_P = \frac{1}{\sqrt{\rho_P}} \quad (7.100)$$

Y por lo tanto como primera aproximación el área máxima de suelo,  $A_{MP}$  que le corresponde a cada planta es:

$$A_{MP} = (d_P/2)^2. \quad (7.101)$$

Por otro lado el área fotosintética,  $A_{fP}$ , que puede exponer una planta al sol sin translaparse con otras plantas [10], está dada por la siguiente relación fenomenológica (ver figura 7-17).

$$A_{fP} = A_{MP} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{\beta B_P}{A_{MP}} \right) \right] \quad (7.102)$$

donde  $\beta$  ( $m^2/kg$ ) es una constante de proporcionalidad que relaciona el tamaño de la planta con el tamaño real de hoja,  $B_P$  es la biomasa vegetal de una planta (kg de materia seca). Por lo tanto el área sin sombra (área potencial de crecimiento) por planta,  $A_{PCP}$ , es

$$A_{PCP} = A_{MP} - A_{fP} \quad (7.103)$$

Así el área fotosintética para todo el ecosistema es

$$A_f = \sum_i^{N_P} A_{fP} = N_P A_{MP} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{\beta N_P B_P}{N_P A_{MP}} \right) \right] \quad (7.104)$$

de la ec. (7.102) es fácil ver que la ec. (7.104) da lugar a

$$A_f = N_P A_{fP} \quad (7.105)$$

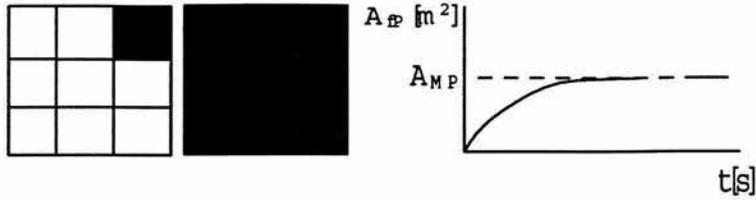


Figura 7-17: Área del ecosistema, máxima, fotosintética, y potencial de crecimiento para cada planta

Con el uso de la ec. (7.103) multiplicada por ambos lados de la igualdad por el número de plantas en el cultivo tenemos que área potencial de crecimiento total del ecosistema,  $A_{PC}$ , esta dada por

$$A_{PC} = N_P A_{PCP} = A_e - A_f \quad (7.106)$$

### 7.10.2. Flujo de radiación solar

Para los propósitos de plantíos, la radiación incidente en la planta se puede separar en dos rangos onda corta (fotosíntesis) y onda larga (infrarroja) causante de la temperatura del medio y efecto de evotranspiración.

El flujo de radiación solar neta de onda corta por unidad de área,  $J_{\phi f P}$ , en  $[W/m^2]$  que llega a  $A_{MP}$  está dada por la ecuación.

$$J_{\phi f P} = a(1 + r)J_T \quad (7.107)$$

donde  $a$  es el coeficiente de absorción de onda corta de la cubierta de la planta,  $r$  es el coeficiente de reflexión del suelo,  $J_T = (J_{difusa} + J_{directa})$  es la radiación de onda corta total que llega a la planta. Donde  $J_{dir}$  y  $J_{dif}$  son la radiación de onda corta directa y difusa respectivamente, ver figura 7-18.

El flujo de radiación neta de onda larga por unidad de área,  $J_{\phi TP}$ , en  $[W/m^2]$  que llega a  $A_{MP}$ , está dada por

$$J_{\phi P} = \alpha_{IR,P} k_B [T_{sky}^4] - \epsilon_P k_B T_P^4 \quad (7.108)$$

donde  $\alpha_{IR,P}$  es el coeficiente de absorción de onda larga de la cubierta,  $(k_B T_{sky}^4)$  es la radiación atmosférica de onda larga que llega a la cubierta,  $(\epsilon_P k_B T_P^4)$  es la radiación de onda larga que sale de la cubierta,  $\epsilon_P$  es la emisividad de la cubierta,  $T_{sky}$  es la temperatura de la atmósfera (K),  $T_P$  es la temperatura de la cubierta vegetal de la planta (K),  $k_B$  es la constante de Stefan Boltzmann (ver figura 7-19).

El flujo de radiación solar neta de onda corta por unidad de área,  $J_{\phi f S}$ , en  $[W/m^2]$  que llega

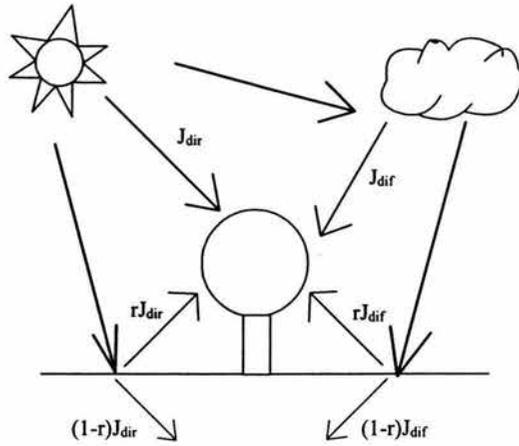


Figura 7-18: Radiación de onda corta que llega a la cubierta vegetal

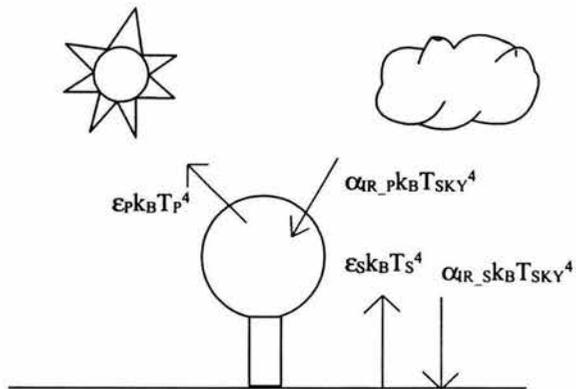


Figura 7-19: Radiación de onda corta

a  $A_{PCP}$  esta dada por la ecuación (ver figura 7-18).

$$J_{\phi fS} = (1 - r)J = \alpha_S J \quad (7.109)$$

donde  $\alpha_S = (1 - r)$  es el coeficiente de absorción del suelo sin sombra.

El flujo de radiación neta de onda larga por unidad de área,  $J_{\phi TS}$ , en  $[W/m^2]$  que llega a  $A_{PCP}$  está dada por

$$J_{\phi TS} = a_{IR,S} k_B T_{sky}^4 - \epsilon_S k_B T_S^4 \quad (7.110)$$

donde  $a_{IR,S}$  es el coeficiente de absorción de onda corta del suelo,  $(k_B T_{sky}^4)$  es la radiación atmosférica de onda larga que llega al suelo,  $(\epsilon_S k_B T_S^4)$  es la radiación de onda larga que sale del suelo,  $T_S$  es la temperatura del suelo (K),  $\epsilon_S$  es la emisividad del suelo

Así la potencia máxima,  $P_{MP}$ , que llega a el área máxima de la planta,  $A_{MP}$ , es.

$$P_{MP} = A_{fP}(J_{\phi fP} + J_{\phi TP}) + A_{PCP}(J_{\phi fS} + J_{\phi TS}) \quad (7.111)$$

Y la potencia total,  $P_T$ , que llega al ecosistema está dada por

$$P_T = N_P P_{MP} \quad (7.112)$$

### 7.10.3. Modelo basado en balances de materia y producción de entropía

Como sabemos un ecosistema terrestre esta formado de varios subsistemas bióticos, las plantas, los animales y los descompostores. Y a la vez cada subsistema esta dividido en especies. En la subsección 7.1.2 de este capítulo consideramos este caso cuando establecemos una ecuación de continuidad que relaciona una especie con las demás. Esto nos da una visión global del problema. No obstante un acercamiento complementario es ver que pasa a nivel de detalle, con la relación entre los subsistemas bióticos, por razones de simplicidad vamos a suponer que tenemos plantas, animales y descompostores de una sola especie. Es claro que en un ecosistema no se puede considerar un subsistema independientemente de otros porque todos están relacionados a través de cadena trófica o alimenticia. Las plantas son las principales productores, le siguen los consumidores (animales y hongos) y después los descompostores (detritus y bacterias) que finalmente producen nutrientes que pueden ser tomados por las plantas y los hongos.

Para facilitar el análisis consideramos que en un ecosistema hay una cierta densidad de animales, animales, hongos, y descompostores por unidad de área. Así nos enfocaremos a analizar una planta, un animal, un hongo, un descompositor, para posteriormente hacer el análisis global. Es claro que las densidades tanto de plantas de cada uno de los subsistemas varia con el tiempo. (Para un cultivo esta densidad es una constante.)

En un ecosistema generalmente se observa que la densidad de plantas es mucho mayor que la densidad de cualquier otro subsistema. Ya que ellas son autotróficas. Así, la densidad de animales en el ecosistema depende de la densidad de plantas.

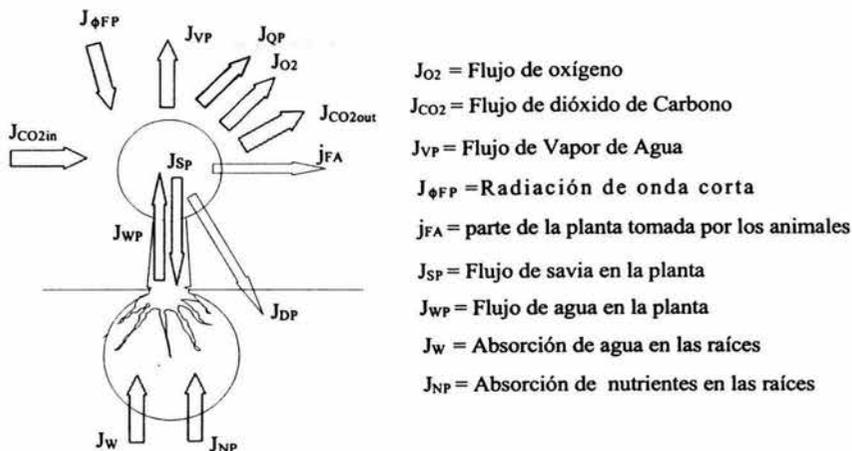


Figura 7-20: Flujo de materia y energía en una planta

#### 7.10.4. Subsistema plantas:

Una planta puede verse como una máquina térmica abierta, que utiliza nutrientes, agua,  $CO_2$  atmosférico, y fotones para crear y mantener su estructura vegetal.

La radiación de onda larga que llega a la planta es utilizada en la transpiración, proceso que regula la temperatura de la planta y proporciona un gradiente de presión entre las raíces y las hojas que da lugar a los flujo de agua en la planta. La radiación de onda corta que llega a la planta es utilizada en la fotosíntesis para la fijación de  $CO_2$  atmosférico, producir glucosa que es el combustible y para sintetizar la energía libre (ATP) requerida por las células de la planta.

La fotosíntesis es una reacción endotérmica que requiere un continuo suministro de energía para que se lleve a cabo, mientras la respiración es un reacción exotérmica que libera calor al sintetizar ATP.

Por otro lado la cantidad de biomasa de una planta depende no sólo de sus fuentes sino también de la presencia de animales y hongos ya que estos se alimentan de plantas.

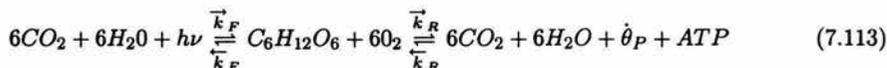
Estrictamente muchas plantas y hongos viven en simbiosis, un ejemplo claro es la micorriza (que toma alimento de la substancia que exuda la planta pero esta aumenta la superficie de raíz de la planta). Por lo tanto la interacción hongo planta no se considera ya que su beneficio es mutuo.

Los principales sustancias producidas y requeridas por una planta son la glucosa, el agua, el oxígeno, y bióxido de carbono y el nitrógeno. Por lo tanto para describir la creación de biomasa de una planta es necesario establecer un ecuación de balance materia para cada uno de ellos.

La creación de biomasa vegetal depende principalmente de la fotosíntesis y la respiración que vimos en el capítulo 4.

Estas dos reacciones forman una reacción autocatalítica. La fotosíntesis es un proceso de creación de materia, y la respiración es un proceso de destrucción donde parte de la materia se convierte en energía libre ATP, que necesitan las células para realizar sus actividades. Es importante notar que en la fotosíntesis se puede decir que la energía solar se convierte en materia o se almacena en forma de materia.

De la ec. (3.24) y ec. (3.25) tenemos que la reacción de fotosíntesis acoplada a la respiración está dada por



donde las velocidades de reacción  $\vec{v}_F, \vec{v}_F, \vec{v}_R, \vec{v}_R$  y las afinidades de reacción  $A_F, A_R$ , de la fotosíntesis y la respiración están dadas respectivamente por

$$\begin{aligned} v_F &= \vec{v}_F - \vec{v}_F; \quad A_F = RT \ln \left( \frac{\vec{v}_F}{\vec{v}_F} \right) \quad \vec{v}_F = \vec{k}_F [CO_2]^6 [H_2O]^6; \quad \vec{v}_F = \vec{k}_F [C_6H_{12}O_6] [O_2]^6 \\ v_R &= \vec{v}_R - \vec{v}_R; \quad A_R = RT \ln \left( \frac{\vec{v}_R}{\vec{v}_R} \right) \quad \vec{v}_R = \vec{k}_R [CO_2]^6 [H_2O]^6; \quad \vec{v}_R = \vec{k}_R [C_6H_{12}O_6] [O_2]^6 \end{aligned}$$

donde  $\vec{k}_F, \vec{k}_R, \vec{k}_F$  y  $\vec{k}_R$  son las constantes de activación y desactivación de la fotosíntesis y la respiración respectivamente. La constantes de activación están dadas por la ec. (2.28)

$$k = \kappa (hk_B/T). e^{-\Delta G/RT}$$

De la ec. (2.4) el cambio del componente  $\gamma$ -ésimo en un sistema abierto donde ocurren  $r$  reacciones está dado por la siguiente relación:

$$\frac{dm_\gamma}{dt} = M_\gamma \sum_{\rho} \nu_{\gamma\rho} \frac{d\xi_\rho}{dt} + \frac{d_e m_\gamma}{dt} \quad (7.114)$$

donde  $v_\rho = \frac{d\xi_\rho}{dt}$  es velocidad de la  $\rho$ -ésima reacción y  $\nu_{\gamma\rho}$  es el correspondiente coeficiente estequiométrico,  $r$  es el número de reacciones,  $M_\gamma$  es la masa molar del  $\gamma$ -ésimo componente.

El primer término de la ec. (7.114) corresponde a la creación de un componente debido a reacciones químicas en el interior del sistema, el segundo término corresponde a flujo neto de masa a través de las fronteras del sistema.

Por lo tanto el cambio  $CO_2$  en la planta está dado por

$$\dot{m}_{CO_2}(t) = M_{CO_2} (-6v_F + 6v_R) + j_{CO_2} \quad (7.115)$$

donde,  $M_{CO_2}$  es la masa molar del  $CO_2$ ,  $j_{CO_2}$  [kg/s] es el flujo de masa de  $CO_2$  a través de la

superficie volumétrica de la planta,  $A_f$ , el cual está dado por

$$j_{CO_2} = \int_{A_f=4\pi R_p^2(t)} J_{CO_2} \cdot dA_f = \int_{A_f=\pi h_p^2(t)} J_{CO_2} \cdot dA_f \quad (7.116)$$

donde,  $h_p(t) = 2R_p(t)$  es la altura de la planta,  $J_{CO_2}$  [kg/s.m<sup>2</sup>] es la densidad de flujo de  $CO_2$  a través de las fronteras de la planta, la cual está dado por la siguiente ecuación de difusión.

$$J_{CO_2} = L_{CO_2} \nabla c_{CO_2} \quad (7.117)$$

donde  $L_{CO_2}$  es el coeficiente de difusión,  $\nabla c_{CO_2}$  es el gradiente de concentración entre la cubierta vegetal y la atmósfera.

El cambio en el agua contenida en la planta,  $\dot{m}_{H_2O}$ , está dada por

$$\dot{m}_{H_2O}(t) = M_{H_2O} (-6v_F + 6v_R) + j_W - j_{VP} \quad (7.118)$$

donde  $M_{H_2O}$  es la masa molar del agua,  $j_W$  es flujo de masa de agua a través de la superficie de raíz,  $j_{VP}$  es el flujo de masa de vapor de agua a través de la superficie volumétrica del follaje.

$$j_W = \int_{A_r} J_W \cdot dA_r \quad \text{y} \quad j_{VP} = \int_{A_f} J_{VP} \cdot dA_f \quad (7.119)$$

donde  $J_W$  y  $J_{VP}$  son las densidades de flujo de agua y vapor de agua que cruzan sus correspondientes fronteras.

$$J_W = L_W \Delta \psi + L_{WNP} \Delta \mu_N \quad (7.120)$$

$$J_{VP} = L_{VP} \nabla c_{H_2O} \quad (7.121)$$

donde  $L_W, L_{WNP}$  son los coeficientes de transporte,  $\Delta \psi$  y  $\Delta \mu_N$  son las diferencias entre el potencial de agua y el potencial químico entre el interior y exterior de la raíz;  $L_{VP}$  es el coeficiente de evaporación,  $\nabla c_{H_2O}$  es el gradiente de presión de vapor de agua entre la hoja y la atmósfera.

El cambio en la glucosa (carbohidratos) contenida en la planta,  $\dot{m}_G$  está dada por

$$\dot{m}_G(t) = M_G (v_F - v_R) \quad (7.122)$$

donde  $M_G$  es la masa molar de  $C_6H_{12}O_6$ .

El cambio de  $O_2$  en la planta,  $\dot{m}_{O_2}$  está dado por

$$\dot{m}_{O_2}(t) = M_{O_2} (6v_1 - 6v_2) - j_{O_2} \quad (7.123)$$

donde  $M_{O_2}$  es masa molar del  $O_2$ ,  $j_{O_2}$  es el flujo de masa de  $O_2$  a través de la superficie de

follaje de la planta.

$$j_{O_2} = \int_{A_f} J_{O_2} \cdot dA_f \quad (7.124)$$

donde la densidad de flujo,  $J_{CO_2}$ , está dada por.

$$J_{O_2} = L_{O_2} \nabla c_{O_2} \quad (7.125)$$

donde  $L_{O_2}$  es un coeficiente de difusión y  $\nabla c_{O_2}$  es el gradiente concentración de  $CO_2$  entre la hoja y la atmósfera.

El cambio total en la biomasa de la planta,  $\dot{B}_P(t)$ , es proporcional al cambio en los componentes que la forman,  $CO_2, H_2O, O_2$  y la glucosa ( $G$ ), a los nutrientes tomados del suelo, pero también es proporcional al número de animales. Ya que los animales se alimentan directamente o indirectamente por plantas. Entonces tenemos que

$$\dot{B}_P(t) = \dot{m}_{CO_2}(t) + \dot{m}_{H_2O}(t) + \dot{m}_G(t) + \dot{m}_{O_2}(t) + j_{NP} - j_{FA} \quad (7.126)$$

donde  $j_{NP}$ , es el flujo de masa de nutrientes a través de la superficie de la raíz dado por

$$j_{NP} = \int_{A_r} J_{NP} \cdot dA_r \quad (7.127)$$

donde la densidad de flujo de nutrientes,  $J_{NP}$ , está dada por

$$J_{NP} = L_{NPW} \Delta\psi + L_{NP} \Delta\mu_N, \quad (7.128)$$

con  $L_{NPW}$ ,  $L_{NP}$  son los coeficientes de transporte de agua y nutrientes,  $\Delta\psi$ ,  $\Delta\mu_N$  son las diferencias de potenciales químicos del agua y nutrientes; y el último término,  $j_{FA}$ , es la biomasa vegetal consumida por los animales [kg/s] que está dada por

$$j_{FA} = \frac{N_A B_A(t)}{N_P} \quad (7.129)$$

donde  $N_A$  es el número de animales. La ec. (7.129) dice que entre más plantas existan la disminución en cada planta va ser menor, entre más animales existan será mayor la disminución en la biomasa de cada planta.

Por otro lado la rapidez de producción de desperdicios de plantas,  $\dot{B}_{DP}(t)$ , está dada en función de la biomasa de las plantas.

$$j_{DP} = \dot{B}_{DP}(t) = k_{DP} B_P(t) \quad (7.130)$$

donde  $k_{DP}$  es una constante de proporcionalidad.

### Flujos de entropía de una planta:

La rapidez de generación de entropía está asociada a los procesos irreversibles que ocurren en el interior de esta, como son la fotosíntesis, la respiración, el flujo interno de agua y savia en la planta, en este caso está dada por.

$$\frac{d_i S_P}{dt} = N_P B_P \frac{\dot{\theta}_P}{T_P} = N_P \left\{ \frac{A_F v_F}{T_P} + \frac{A_R v_R}{T_P} + \frac{j_{WP} \nabla(\mu_{WP})}{T_P} + \frac{J_{SP} \nabla \mu_{SP}}{T_P} \right\} \quad (7.131)$$

donde el primero y segundo término corresponde a la fotosíntesis y a la respiración, el tercero y cuarto término corresponde al flujo interno de agua,  $J_{WP}$ , y savia en la planta,  $J_{SP}$ , que también disipan en energía libre.  $\dot{\theta}$  es la tasa metabólica específica de una planta. Es importante notar que  $A_F v_F < 0$  pero en conjunto  $A_F v_F + A_R v_R > 0$ .

El flujo de entropía de una planta por interacción con su exterior está dada por

$$\begin{aligned} \frac{d_e S_P}{dt} = & \left[ \frac{J_{\phi P}}{T_{Sol}} - \frac{\lambda J_{VP}}{T_P} - \frac{J_Q}{T_P} \right] A_{fP} + s_{CO_2} j_{CO_2} - s_{O_2} j_{CO_2} + \\ & + s_W j_W + s_{NP} j_{NP} - s_{DP} j_{DP} - s_{FA} j_{FA} \end{aligned} \quad (7.132)$$

donde  $J_{\phi P}$  es es radiación de onda corta que llega a la planta,  $T_{Sol}$  es la temperatura del sol a la cual es emitida radiación,  $\lambda J_{VP}$  es la razón de pérdida energía por calor latente,  $\lambda$  es calor latente de vaporización del agua,  $J_Q$  es la razón de pérdida de energía de la planta por calor sensible,  $A_{fP}$  es el área fotosintética. Los primeros tres términos de la ec. (7.132) corresponden a un flujo de entropía debido a un flujo de energía, y los siete términos restantes corresponden a un flujo entropía debido a flujos de masa,  $s_\gamma$  es la **entropía por unidad de kg** ( J/K.kg). En general la temperatura de una planta es variable no obstante se puede considerar constante.

### 7.10.5. Subsistema hongos

Los hongos no se pueden despreciar en un ecosistema ya que ellos viven en simbiosis con plantas y además proporcionan alimento a animales, ellos al igual que la plantas toman nutrientes del suelo, no obstante ellos no realizan fotosíntesis. (ver figura 7-21)

La rapidez de producción de biomasa de un hongo,  $\dot{B}_F(t)$ , es proporcional a la cantidad de nutrientes y al número de animales,  $N_A(t)$ .

$$\dot{B}_F(t) = k_{FF} \cdot j_{FF} - k_{FFA} j_{FFA} \quad (7.133)$$

donde  $k_{FF}$  ,  $k_{FFA}$  son constantes de proporcionalidad,  $j_{FF}$  es el flujo de masa de nutrientes al hongo y  $J_{FFA}$  es rapidez de consumo de un hongo por un animal, los cuales están dados respectivamente por

$$j_{FF} = \int_{A_{Fr}} J_{FF} \cdot dA_{Fr}, \quad (7.134)$$

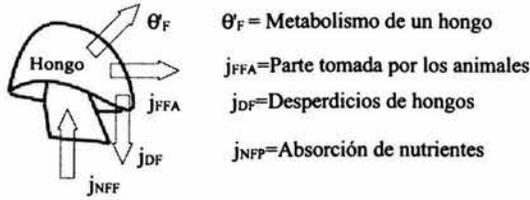


Figura 7-21: Flujos de materia en un hongo

$$j_{FFA} = \frac{N_A B_A(t)}{N_F} \quad (7.135)$$

donde  $J_{FF}$  es la densidad de flujo de nutrientes a través de una frontera de la superficie  $A_{Fr}$ ,  $N_F$  es el número de hongos en el ecosistema.

La rapidez de producción de desperdicios de los hongos,  $\dot{B}_{DF}(t)$  están en función de la biomasa de hongos

$$j_{DF} = \dot{B}_{DF}(t) = k_{DF} B(t) \quad (7.136)$$

donde  $k_{DF}$  es una constante de proporcionalidad.

La rapidez de generación de entropía del subsistema hongos esta dada por

$$\frac{d_i S_F}{dt} = N_F B_F \frac{\dot{\theta}_F(t)}{T} \quad \text{y} \quad \frac{d_e S_F}{dt} = s_{FF} \cdot j_{FF} - s_{DF} \cdot j_{DF} - s_{FFA} \cdot j_{FFA} \quad (7.137)$$

donde  $\dot{\theta}_F(t)$  [W/kg] es la tasa metabólica específica de un hongo.

#### 7.10.6. Subsistema animales

En general hay dos clases de animales, los herbívoros y los carnívoros, entre ellos hay una interacción conocida como presa-predador la cual no se discutirá en esta sección. (Como se sabe esta interacción dirige a un estado estacionario estable ya sea atractores de punto, ciclos límites o caóticos).

Se considera a un animal en general y no hacemos una distinción entre especies.

El cambio en la biomasa de un animal,  $\dot{B}_A(t)$  es proporcional a su alimento, es decir es proporcional a la cantidad de biomasa vegetal, y la biomasa de hongos.

$$\dot{B}_A(t) = k_{FA} \frac{N_P \cdot B_P(t)}{N_A} + k_{FF} \frac{N_F \cdot B_F(t)}{N_A} \quad (7.138)$$

donde  $k_{FA}$ ,  $k_{FF}$  son constantes de proporcionalidad,  $N_P$  es el número de plantas,  $N_F$  es el número de animales,  $N_A$  es el número de animales. Por otro lado la rapidez de producción de

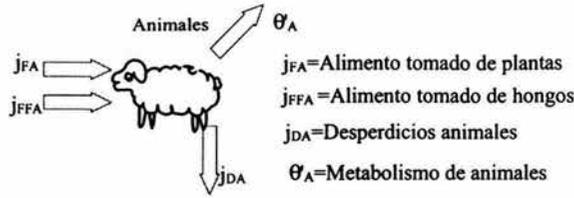


Figura 7-22: Flujos de materia en un animal

desechos por un animal,  $B_{DA}(t)$ , esta dado por

$$j_{BA} = \dot{B}_{DA}(t) = k_{DA}B_A(t) \quad (7.139)$$

donde  $k_{DA}$  es constante de proporcionalidad.

### Flujos de entropía en el subsistema de animales

$$\frac{d_i S_A}{dt} = N_A B_A \frac{\dot{\theta}_A}{T_A} \quad \text{y} \quad \frac{d_e S_A}{dt} = s_{FA} j_{FA} + s_{FFA} j_{FFA} - s_{DA} j_{DA} \quad (7.140)$$

donde  $\dot{\theta}_A$  es la tasa metabólica específica de un animal,  $T_A$  es la temperatura de un animal, que para mamíferos prácticamente se puede considerar constante con un valor de  $37^\circ \text{C}$ .

### 7.10.7. Subsistema descompostores de detritus

Los descompostores aprovechan para vivir la energía libre remanente la cual reside en las estructuras biológicas residuales llamadas detritus. Al final el aprovechamiento de la energía libre conduce a la destrucción máxima de la estructura biológica produciendo los desechos de los organismos descompostores de materia que cierran el ciclo biológico aportando los nutrientes del siguiente ciclo.

El cambio en la biomasa de un descompostor,  $\dot{B}_D(t)$ , es directamente proporcional a la biomasa de desperdicios animales  $B_{DA}(t)$ , vegetales  $B_{DP}(t)$ , y de los hongos  $B_{DF}(t)$ , e inversamente proporcional al número de detritus,  $N_D$ , en el sistema  $N_P$ .

$$\dot{B}_D(t) = k_{DDP} \frac{N_P B_{DP}(t)}{N_D} + k_{DDF} \frac{N_F B_{DF}(t)}{N_D} + k_{DDA} \frac{N_A B_{DA}}{N_D} \quad (7.141)$$

Los desechos de un descompostor (nutrientes) son proporcionales a su biomasa.

$$j_{ND} = \dot{B}_{ND}(t) = k_{ND} B_D(t) \quad (7.142)$$

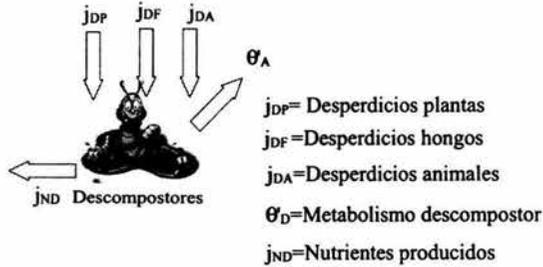


Figura 7-23: Flujos de materia en un descompositor

### Flujos de entropía de descompositores :

La rapidez de generación de entropía y el flujo de entropía en el subsistema detritus está dada por

$$\frac{d_i S_D}{dt} = N_D B_D \frac{\theta_D}{T_D} \quad \text{y} \quad \frac{d_e S_D}{dt} = s_{DP} j_{DP} + s_{DA} j_{DA} + s_{DF} j_{DF} - s_{ND} j_{ND} \quad (7.143)$$

Para la notación de los flujos ver la figura 7-23.

### 7.10.8. Subsistema bacterias fijadoras de nitrógeno

Las bacterias fijadoras de nitrógeno son importantes en el ciclo de nutrientes ya que ellos regulan la concentración de N (nitrógeno) en la atmósfera y además proporcionan nutrientes a la planta. Estas bacterias, otras, cianofilas y actinocicetes son derivadas directas de antiguas o primitivas procariontes (de aproximadamente 3,8000 millones de años). Hoy ellos viven libres en el suelo y otras como las rizobiales en simbiosis con la planta. Las cianobacterias incluyen hoy a las algas verdeazules. Las rizobiales son bacterias que viven en nódulos especiales de las raíces de algunas plantas especialmente de las legumbres. Ellas viven en simbiosis con la planta. La planta alojadora le proporciona compuestos de carbón, enzimas necesarios para la asimilación del amonio, y protege a los bacteroides de concentración de oxígeno excesiva [11].

La fijación  $N_2$  depende del suministro de fotosintae de la planta alojadora, la temperatura y el contenido de agua en el suelo.

Por simplicidad supongamos que el número de bacterias proporcional, al número de plantas y otro factor que representa condiciones de desarrollo,  $CD$

$$\dot{B}_B(t) = k_{FB} \frac{N_P B_P}{N_B} CD \quad (7.144)$$

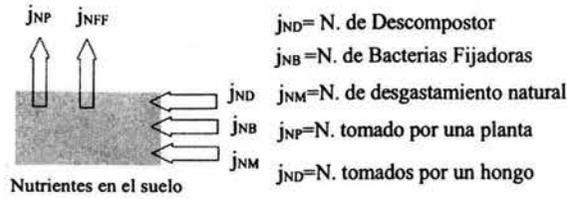


Figura 7-24: Flujo de nutrientes en el suelo

donde  $k_{FB}$  es una constante de proporcionalidad.

Entonces la producción de nutrientes ricos en nitrógeno, es proporcional a la cantidad de bacterias, y al cantidad de nitrógeno excedente en la atmósfera,  $N_E$

$$j_{NB} = \dot{B}_{NB}(t) = f_B(B_B(t), N_E, W_S) \quad (7.145)$$

La rapidez de generación de entropía y flujo de entropía del sistema descompostores está dada por

$$\frac{d_i S_A}{dt} = N_B B_B \frac{\dot{\theta}_B}{T_S} \quad \text{y} \quad \frac{d_e S_B}{dt} = s_{N_E} N_E - s_{N_B} j_{NB} \quad (7.146)$$

donde el  $\dot{\theta}_B$  es la tasa metabólica específica de un bacteria fijadoras de nitrógeno.

### 7.10.9. Subsistema Suelo

El suelo es un gran reservorio de nutrientes, la cantidad de nutrientes en este depende, de la producción de nutrientes por el desgastamiento natural de la piedras, por los descompostores, y por las bacterias fijadoras de nitrógeno (ver figura 7-24). El suelo también es un reservorio de agua, donde el agua llega via lluvia, de la cual una parte es tomada por las plantas y otra parte es filtrada a los mantos acuíferos (ver figura 7-25).

El cambio en los nutrientes contenidos en suelo,  $\dot{m}_N$ , es igual a la suma de la razón cambio de los nutrientes producidos por desgaste natural de las plantas,  $j_{NM}$ , los descompostores de detritus,  $j_{ND}$ , las bacterias fijadoras de nitrógeno,  $j_{NB}$ , menos la razón de toma de nutrientes por parte de la planta,  $N_P j_{NP}$  y los hongos,  $N_F j_{FF}$ .

$$\frac{dm_N}{dt} = j_{ND} + j_{NB} + j_{NM} - N_P j_{NP} - N_F j_{FF} \quad (7.147)$$

El cambio en la cantidad de agua en el suelo es proporcional al flujo de agua de lluvia,  $j_{WLL} = J_{WLL} A_e$ , al agua filtrada o transminada a los mantos acuíferos,  $j_{WF}$ , al agua evaporada de suelo,  $j_{VS} = J_{VS} A_{PC}$ , y al agua absorbida por la planta,  $N_P j_W$ .

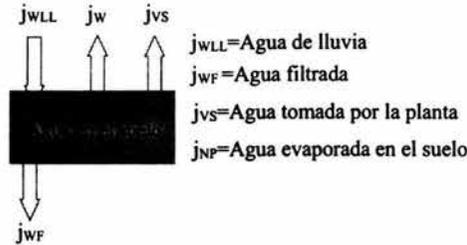


Figura 7-25: Flujo de agua en el suelo

$$\frac{dm_{WS}}{dt} = j_{WLL} - j_{WF} - j_{VS} - N_P j_W \quad (7.148)$$

En estado estacionario podemos suponer que la temperatura del suelo se mantiene constante,  $T_S = \text{cte}$ . El estado estacionario se refiere al hecho de que de la cantidad de energía que por radiación del sol al suelo es igual a la que sale del suelo.

Dado que la radiación que llega al área potencial de crecimiento realiza trabajo ya que evapora agua del suelo, además de calentarlo podemos expresar la rapidez de generación de entropía debida a este proceso como

$$\frac{d_e S_S}{dt} = \left( \frac{J_{\phi S}}{T_{Sol}} - \frac{\lambda J_{VS}}{T_S} - \frac{J_{QS}}{T_S} \right) A_{PC} \quad (7.149)$$

donde  $J_{\phi S}$  es la radiación de onda corta que llega al área potencial de crecimiento,  $\lambda$  es el calor latente vaporización,  $T_{Sol}$  es la temperatura del sol,  $J_{VS}$  es la densidad de flujo de agua evaporada del suelo,  $J_{QS}$  es la densidad de flujo de calor sensible del suelo,  $T_S$  es la temperatura media del suelo,  $A_{PC}$  es el área potencial de crecimiento del ecosistema.

#### 7.10.10. Flujos de entropía en un ecosistema

La rapidez de generación entropía y el flujo de entropía total de un ecosistema está dada por (2.42) con

$$\begin{aligned} \frac{d_i S}{dt} &= \frac{d_i S_P}{dt} + \frac{d_i S_F}{dt} + \frac{d_i S_A}{dt} + \frac{d_i S_D}{dt} + \frac{d_i S_B}{dt} \\ \frac{d_e S}{dt} &= \frac{d_e S_P}{dt} + \frac{d_e S_F}{dt} + \frac{d_e S_A}{dt} + \frac{d_e S_D}{dt} + \frac{d_e S_B}{dt} + \frac{d_e S_S}{dt} \end{aligned} \quad (7.150)$$

De las ecs.(7.132), (7.131),(7.137), (7.140), (7.143), (7.146) y (7.149) tenemos que

$$\frac{d_i S}{dt} = N_P B_P \frac{\dot{\theta}_P}{T_P} + N_F B_F \frac{\dot{\theta}_F}{T_F} + N_A B_A \frac{\dot{\theta}_A}{T_A} + N_D B_D \frac{\dot{\theta}_D}{T_D} + N_B B_B \frac{\dot{\theta}_B}{T_B} \quad (7.151)$$

suponiendo que hay una temperatura media del ecosistema.

$$\bar{T} \equiv \frac{\sum_i^n N_i B_i T_i}{\sum_i^n N_i B_i} \quad (7.152)$$

entonces podemos expresar la rapidez de generación entropía de un ecosistema como

$$\frac{d_i \bar{S}}{dt} \cong \frac{\sum_i^n N_i B_i \dot{\theta}_i}{\bar{T}} \quad (7.153)$$

Por otro lado tenemos que el **flujo de entropía** debido a la interacción del ecosistema con su medio abiótico está dada por

$$\begin{aligned} \frac{d_e S}{dt} = & \left( \frac{J_{\phi P}}{T_{Sol}} - \frac{\lambda J_{VP}}{T_P} - \frac{J_{QP}}{T_P} \right) A_f + s_{CO_2} J_{CO_2} - s_{O_2} J_{O_2} \\ & + \left( \frac{J_{\phi S}}{T_{Sol}} - \frac{\lambda J_{VS}}{T_S} - \frac{J_{QS}}{T_S} \right) A_{PC} + s_{N_E} N_E + s_{NM} J_{NM} + s_{WLL} J_{WLL} \end{aligned} \quad (7.154)$$

La ecuación (7.154) la podemos re-agrupar como

$$\frac{d_e S}{dt} = \dot{S}_{in} - \dot{S}_{out} \quad (7.155)$$

donde definimos el flujo entrópico de entrada como

$$\dot{S}_{in} = \left( \frac{J_{\phi P}}{T_{Sol}} \right) A_f + \left( \frac{J_{\phi S}}{T_{Sol}} \right) A_{PC} + s_{CO_2} J_{CO_2} + s_{N_2} J_{N_2} + s_{NM} J_{NM} + s_{WU} J_{WU} \quad (7.156)$$

y el flujo entrópico de salida como

$$\dot{S}_{out} = \left( \frac{\lambda J_{VP}}{T_{Sol}} + \frac{J_{QP}}{T_P} \right) A_f + \left( \frac{\lambda J_{VS}}{T_P} + \frac{J_{QS}}{T_P} \right) A_{PC} + s_{O_2} J_{O_2} \quad (7.157)$$

Por lo tanto de manera compacta podemos expresar la rapidez de generación de entropía total de un ecosistema como

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{\sum_i^n N_i B_i \dot{\theta}_i}{T_i} + \dot{S}_{in} - \dot{S}_{out} \quad (7.158)$$

Integrando esta ecuación en estado estacionario  $dS(t)/dt$ , respecto a un año tenemos que

$$\int_t^{t+1} \left\{ \frac{\sum_i^n N_i B_i \dot{\theta}_i}{T_i} \right\} dt = - \int_t^{t+1} (\dot{S}_{in} - \dot{S}_{out}) dt = \frac{P_0}{T} \quad (7.159)$$

Es decir el flujo de entropía  $\dot{S}_{in}$  es la encargada de descargar la generación interna de entropía. Esta ecuación es análoga a la ec. (6.9) a la obtenida por Sverizhev op. cit. No obstante esta nos da más información sobre qué flujos están involucrados en la rapidez de generación de entropía de cada uno de los sistemas bióticos así como fuentes de potencia que descargan la generación de entropía interna del ecosistema y mantienen el estado estacionario.

La biomasa promedio de un organismo en un ecosistema,  $\bar{B}$ , está dada por

$$\bar{B} = \frac{\sum_i N_i B_i}{\sum_i N_i} \quad (7.160)$$

entonces la biomasa total del ecosistema,  $B_{eco}$ , está dada por

$$B_{eco} = \bar{B} \sum_i N_i \quad (7.161)$$

La energía total en un ecosistema,  $E_{Teco}$ , está dada por

$$E_{Teco} = \sum e_i N_i = \bar{e} \sum_i N_i; \quad \bar{e} \equiv \frac{\sum_i e_i N_i}{\sum_i N_i} \quad (7.162)$$

donde  $\bar{e}$  es la energía promedio de cada organismo del ecosistema.

### 7.10.11. Análisis comparativo entre un Agroecosistema y Agrosistema

La idea de esta sección es hacer un análisis comparativo basado en termodinámica, entre un agroecosistema y agrosistema. Un agroecosistema es básicamente un ecosistema, más entradas adicionales de materia (agroquímicos, agua) y energía (calefacción, combustibles para maquinaria, labor humana) y salidas de productos (cosecha). Con la característica de que existe un planta dominante impuesta por el humano (planta de cultivo).

Un agrosistema sólo se refiere a un área en la que existe un conjunto de plantas de cultivo de una sola especie, y una cantidad muy pequeña de animales.

**Las ventajas a priori de un agroecosistema son:**

1) Los ciclos son más cerrados, hay menos pérdida de nutrientes, hay más capa vegetal y por lo tanto las pérdidas de suelo por erosión son menores, hay menos pérdidas de agua ya que la estructura del suelo es más orgánica y además, al haber más capa vegetal las pérdidas por evaporación de agua en el suelo son menores.

2) Dado que en un agroecosistema hay diversidad de especies, las especies perjudiciales para la planta (insectos, pájaros, roedores) tienen sus depredadores naturales que hacen que su población se mantenga regulada).

3) En un agroecosistema como hay más conservación de nutrientes y una mayor regulación

de la población de los animales perjudiciales a la planta, la necesidad de usar agroquímicos (fertilizantes y pesticidas) se reduce. Por lo tanto el costo por kg de producto producido a largo plazo es menor que un kg producido por agrosistema.

4) Una desventaja de un agroecosistema es que su producción es limitada. No tan alta como la de agrosistema. Pero es más sustentable a largo plazo.

**Las ventajas del agrosistema son:**

1) La productividad es alta, ya que se trata de acabar con todas las especies vegetales que compiten incluyendo árboles, ya que estos hacen sombra y disminuyen la producción de las plantas en tales partes. Es raro ver campos de cultivo de granos rodeados de árboles. A corto plazo es muy rentable un agrosistema ya que una vez que se removió un ecosistema vegetal el suelo es bastante rico, pero como los ciclos se alteran, y las especies que lo mantenían murieron, eventualmente el agrosistema se va deteriorando, requiriendo cada vez mayor cantidad de fertilizantes para mantener la productividad, y por otro lado al eliminar la diversidad de especie hay un desequilibrio en la población de especies naturales dando lugar a la vulnerabilidad al ataque de plantas por plagas. Por lo tanto a largo plazo el costo por kg de producto producido es grande.

Por lo tanto, aspectos importantes a evaluar en esta comparación son el costo de la energía externa para alcanzar una producción anual dada, la cantidad de fertilizantes y venenos utilizados, el costo por kilogramo producido, impacto medio ambiental en términos de la producción de entropía.

### 7.10.12. Agroecosistema

Las ecuaciones que describen a un agroecosistema son las mismas que describen a un ecosistema con ligeras modificaciones. La primera modificación es la cantidad de nutrientes en el suelo en la que se suman dos términos, la aplicación de fertilizantes y dos el término debido a la erosión del suelo.

$$\frac{dm_N}{dt} = j_{ND} + j_{NB} + j_{NM} + j_{NF} - N_P j_{NP} - N_F j_{NF} - j_{ES} \quad (7.163)$$

donde  $j_{NF}$  es flujo de nutrientes por fertilización (kg/s),  $j_{ES}$  es la pérdida de nutrientes debido a la erosión del suelo (kg/s). La ecuación de balance de agua en el suelo también cambia ya que se le agrega lo que corresponde a la irrigación.

$$\frac{dW_s}{dt} = j_{WLL} + j_{WIR} - j_{WF} - j_{VS} - N_P j_{W} \quad (7.164)$$

donde  $j_{WIR}$  es el flujo de agua por irrigación (kg/s).

Las nuevas ecuaciones que faltan agregan costo por irrigación, costo fertilización, costo por labranza, costo de maquinaria y mantenimiento de esta (combustibles).

### 7.10.13. Flujos de entropía en un agroecosistema

Análogamente en un ecosistema tenemos que la rapidez de generación de entropía de un agroecosistema,  $d_i S^{Ag}/dt$ , está dada por

$$\frac{d_i S^{Ag}}{dt} = \left( N_P B_P \frac{\dot{\theta}_P}{T_P} + N_F B_F \frac{\dot{\theta}_F}{T_F} + N_A B_A \frac{\dot{\theta}_A}{T_A} + N_D B_D \frac{\dot{\theta}_D}{T_D} + N_B B_B \frac{\dot{\theta}_B}{T_B} \right)_{Ag} \quad (7.165)$$

Entonces

$$\frac{d_i S}{dt} = \frac{\sum_i^n N_i B_i \dot{\theta}_i}{\bar{T}_{Ag}}$$

y el flujo de entropía es

$$\begin{aligned} \frac{d_e S^{Ag}}{dt} = & \left( \frac{J_{\phi P}}{T_{Sol}} - \frac{\lambda J_{VP}}{T_P} - \frac{J_{QP}}{T_P} + \right) A_f^{Ag} + s_{CO_2} j_{CO_2} - s_{O_2} j_{O_2} \\ & + \left( \frac{J_{\phi S}}{T_{Sol}} - \frac{\lambda J_{VS}}{T_S} - \frac{J_{QS}}{T_S} \right) A_{PC} + s_{N_E} N_E + s_{WIR} j_{WIR} + s_{NF} j_{NF} + s_{NM} j_{NM} + s_{WLL} j_{WLL} \end{aligned} \quad (7.166)$$

La ecuación (7.166) la podemos reagrupar como

$$\frac{d_e S}{dt} = \dot{S}_{in}^{Ag} - \dot{S}_{out}^{Ag}$$

donde definimos el flujo entrópico de entrada del agroecosistema como

$$\begin{aligned} \dot{S}_{in}^{Ag} = & \left( \frac{J_{\phi P}}{T_{Sol}} + s_{CO_2} j_{CO_2} \right) A + \left( \frac{J_{\phi S}}{T_{Sol}} \right) A_{PC} + s_{N_E} N_E + s_{WIR} j_{WIR} + s_{NF} j_{NF} + \\ & + s_{NM} j_{NM} + s_{WLL} j_{WLL} + s_{CO_2} j_{CO_2} \end{aligned}$$

y al flujo entrópico de salida del agroecosistema como

$$\begin{aligned} \dot{S}_{out}^{Ag} = & \left[ \left( \frac{\lambda J_{VP}}{T_{Sol}} + \frac{J_{QP}}{T_P} + s_{O_2} j_{O_2} \right) A_f^{Ag} + \left( \frac{\lambda J_{VS}}{T_P} + \frac{J_{QS}}{T_P} \right) A_{PC}^{Ag} \right] + s_{O_2} j_{O_2} \\ \frac{d S^{Ag}}{dt} = & \left( \frac{\sum_i^n N_i B_i \dot{\theta}_i}{\bar{T}} \right)_{Ag} + \dot{S}_{in}^{Ag} - \dot{S}_{out}^{Ag} \end{aligned}$$

A partir de aquí se sugiere hacer un análisis parecido al que hace Sverizhev. (Pendiente)

#### 7.10.14. Flujos de entropía del agrosistema

Para un agrosistema la rapidez de generación de entropía simplemente está dada por

$$\frac{d_i S^{Agr}}{dt} = \left( N_P B_P \frac{\dot{\theta}_P}{T_P} + N_D B_D \frac{\dot{\theta}_D}{T_D} \right)_{Agr}$$

#### 7.11. Respuesta de un cultivo a perturbaciones

Sin pérdida de generalidad podemos suponer que nuestro agrosistema esta compuesto de dos especies: 1) Plantas de cultivo 2) Hierbas.

El estado estacionario de un agrosistema es mantenido (producción anual), gracias a un suministro constante anual de Materia (fertilizantes, agua) y Energía (combustible para máquinas, labor humana).

Por simplicidad vamos a suponer que nuestro ecosistema sólo tiene como entradas humanas: 1) Fertilizantes; 2) Labor humana (deshierbar el cultivo).

Una pregunta natural que nos surge es cómo responde nuestro agrosistema si dejamos de aplicar algunas de esas entradas.

Ya sabemos que los cultivos abandonados evolucionan a un estado de máxima biomasa siempre y cuando se den las condiciones (sucesión de campo viejo). Pero lo que aquí nos interesa es ver que pasa con la producción anual de cultivo (cosecha), cómo disminuye si dejamos de aplicar alguna entrada. La idea de hacer este análisis es poder establecer una metodología para ver ante que perturbaciones es más sensible un agrosistema (cultivo). Por lo que vamos analizar dos casos: 1) respuesta al dejar de aplicar fertilizante; 2) respuesta al dejar de fertilizar y dehierbar.

##### 7.11.1. Caso 1: respuesta al dejar de aplicar fertilizante.

Supongamos que al tiempo  $t_0$  se dejan de suministrar fertilizantes. ¿Qué pasa con la producción del agroecosistema, y la densidad de las especies de plantas?.

##### Hipótesis:

1) La biomasa de las plantas de cultivo van a disminuir, ya que dejan de estar en su óptimo de fertilización, aunque se siga eliminando su competencia. Variables: Sea  $B_{PT}(t)$  la biomasa total de plantas de cultivo al tiempo  $t$ ,  $B_{PT0}$  la biomasa total de plantas de cultivo al periodo  $t = \infty$ . Suponiendo un disminución anual en la biomasa de plantas tenemos que

$$B_{PT} = B_{PT0} - dB_{PT} \quad (7.167)$$

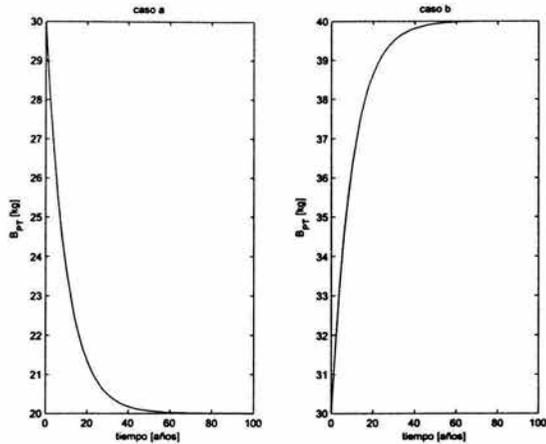


Figura 7-26: Respuesta al dejar de aplicar fertilizantes

Por lo tanto el cambio de la biomasa total de plantas de cultivo en cada periodo está dado por

$$\frac{dB_{PT}}{dt} = -\frac{B_{PT} - B_{PT0}}{\tau} \quad (7.168)$$

donde  $\tau$  es el tiempo de relajación del sistema.

La solución a la ec. (7.168) está dada por

$$B_{PT}(t) = B_{PT0} \left[ 1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau}} \right] + B_{PT}(t_0) e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau}} \quad (7.169)$$

de donde vemos que para  $t = t_0$  tenemos que  $B_{PT}(t_0)$  la producción al tiempo inicial y para  $t = \infty$  tenemos  $B_{PT}(\infty) = B_{PT0}$ .

La ec. (7.169) explica dos casos: a) cuando  $B_{PT}(t_0) > B_{PT0}$ ; b) cuando  $B_{PT}(t_0) < B_{PT0}$ .

Caso a)  $B_{PT0} = 20$  y  $B_{PT}(t_0) = 30$  ver figura 7-26.

Caso b)  $B_{PT0} = 40$  y  $B_{PT}(t_0) = 30$  ver figura 7-26.

Aquí una pregunta, de qué depende el tiempo de relajación. Este punto se discutirá en un subsección posterior.

### 7.11.2. Caso 2: respuesta al dejar de aplicar fertilizantes y dehierbar

#### Hipótesis:

1) La biomasa de las plantas de cultivo van a disminuir, la competencia con otras especies aumenta (decaimiento exponencial hacia su estado silvestre).

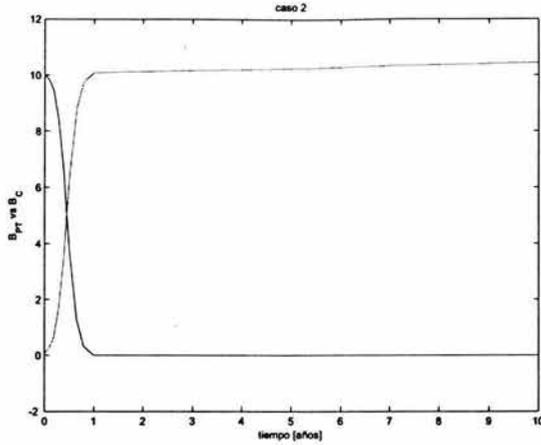


Figura 7-27: Respuesta al dejar de aplicar fertilizantes y dejar de deshierbar

- 2) La biomasa de la plantas competidoras aumenta y su biomasa va aumentar (aumento exponencial)
- 3) En el primer período dado que ya no hay salida de materia, la biomasa total aumenta, respecto al periodo anterior

**Variables:**

Sea  $B_C$  la biomasa total de hierbas al periodo  $t$ ,  $B_{C0}$  la biomasa de total de hierbas después de el periodo  $t = \infty$ . Cualitativamente la biomasa de las plantas de cultivo va a disminuir, mientras las plantas silvestres o competidoras van a aumentar, de donde tenemos que

$$\frac{dB_{PT}}{dt} = -\frac{B_{PT} - B_{PT0}}{\tau} - b \cdot B_{PT} \cdot B_C \tag{7.170}$$

$$\frac{dB_C}{dt} = b \cdot B_{PT} \cdot B_C \tag{7.171}$$

En la figura 7-27 se muestran los resultados de la simulación de este tipo de respuesta.

**7.11.3. Análisis cualitativo del caso 1**

El análisis cualitativo que se hace en el caso 1 es encontrar un relación entre el tiempo de relajación  $\tau$  y los proceso que ocurren en una planta.

Algo que sabemos es que la cantidad de fertilizantes naturales,  $NF_{na}$ , para una planta

de cultivo es menor a la cantidad óptima de fertilizante,  $NF_{op}$ , que necesita una planta para desarrollar todo su potencial de crecimiento, es decir

$$NF_{na} \leq NF_{na} + NF_H = NF_{op} \quad (7.172)$$

donde  $NF_H$  son los nutrientes suministrados por el humano.

El volumen de suelo  $V_{NF}$  del que la planta toma el fertilizante está dado por dos factores principales, la superficie correspondiente a cada planta y la profundidad,  $h_r(t)$ , hasta donde se encuentran las raíces. La superficie para cada planta está dada por la ec. (7.101), por lo tanto el volumen,  $V_{NF}$ , está dado por

$$V_{NF} = (d_P/2)^2 \cdot h_r(t) = \frac{h_r(t)}{4\rho_P} \quad (7.173)$$

De esta ecuación se ve que si aumenta la densidad superficial, la cantidad de volumen de suelo para la toma de nutrientes de una planta disminuye. Es decir, aumenta la competencia por los nutrientes. Es importante mencionar que la profundidad de las raíces también varía con el tiempo pero llega a un estado estacionario en su madurez.

Otro factor importante en la densidad superficial es que si es muy grande, entonces las cubiertas de las plantas van a hacerse sombra entre sí, reduciendo así el potencial de crecimiento de cada planta. Por ello se debe pensar en una distribución de las plantas de tal manera que la cubierta de las plantas en su estado de madurez no se traslapen. En cierta medida esto también ayudaría a que las raíces de estas plantas no se entremezclen. Ello se conoce bien a nivel empírico, pero era necesario establecerlo para propósito de nuestro análisis.

Sea  $\rho_{NF}$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) la densidad volumétrica de fertilizante en el volumen  $V_{NF}$ . Esta cantidad depende del suministro de fertilizante por parte del humano y de la toma del fertilizante por la planta. En el volumen  $V_{NF}$  podríamos establecer la siguiente ecuación de balance de fertilizante.

$$\frac{\partial \rho_{NF}}{\partial t} + \nabla J_{NF} = P[NF] \quad (7.174)$$

donde el término  $P[NF]$  corresponde a la creación de ese fertilizante por los residuos o basura descompuesta en el suelo,  $J_{NF}$  es la suma del flujo de fertilizante proporcionado por el humano,  $J_{FNH}$  es el flujo de fertilizante del suelo a la planta,  $J_{FSP}$  es el fertilizante que se mueve hacia una región más abajo del fondo de las raíces (este movimiento puede ocurrir por difusión por la acción de la gravedad cuando hay un medio acuoso),  $J_{FSD}$ . Así  $J_{NF}$  viene dado por

$$J_{NF} = J_{FNH} - J_{FSP} - J_{FSD} \quad (7.175)$$

En el sistema en estado estacionario tanto natural como modificado la densidad volumétrica del fertilizante debe mantenerse constante ya que hay un suministro constante de fertilizante. En el caso natural por reciclaje en circuito cerrado; y en el caso del cultivo por reposición de nutrientes al comienzo de cada ciclo una vez que se realizó la cosecha.

Si conocemos  $\rho_{NF}$  (obtenida de la ec. (7.174) y conocemos el  $V_{NF}$  de la ec. (7.173) podemos conocer la cantidad de fertilizante disponible para la planta  $NF$  (Kg).

$$NF = \rho_{NF} V_{NF} = \rho_{NF} \frac{h_r(t)}{4\rho_P} \quad (7.176)$$

Por otro lado, empíricamente se sabe que el cambio de la producción de biomasa de una planta, ( $\Delta B_P$ ), en un periodo natural es proporcional al cambio en la cantidad de fertilizante disponible en ese periodo,  $\Delta(NF)$ , para la planta.

$$\Delta B_P = \alpha_{NF} \Delta(NF) \quad (7.177)$$

donde  $\Delta(NF)$  es el incremento del fertilizante absorbido que pasó a formar parte de la planta

$$\Delta(NF) = \Delta\left(\rho_{NF} \frac{h_r}{4\rho_P}\right) = \frac{1}{4\rho_P} \Delta(\rho_{NF} h_r) = \frac{1}{4\rho_P} [\Delta(\rho_{NF}) h_r + \Delta(h_r) \rho_{NF}] \quad (7.178)$$

Ahora el cambio total de la biomasa en el cultivo está dada por

$$\Delta B_{PT} = \Delta B_P \cdot \rho_P \cdot A_P \quad (7.179)$$

$$\Delta B_{PT} = \alpha_{NF} \cdot \frac{1}{4\rho_P} [\Delta(\rho_{NF}) \cdot h_r + \Delta(h_r) \cdot \rho_{NF}] \cdot \rho_P \cdot A_P$$

$$\Delta B_{PT} = \alpha_{NF} \cdot \frac{A_P}{4} [\Delta(\rho_{NF}) \cdot h_r + \Delta(h_r) \cdot \rho_{NF}]$$

de donde

$$\frac{dB_{PT}}{dt} = \frac{dB_P}{dt} \rho_P \cdot A_P \quad (7.180)$$

$$\frac{dB_{PT}}{dt} = \frac{\alpha_{NF} \cdot A_P}{4} \left[ \frac{d(\rho_{NF})}{dt} \cdot h_r + \frac{d(h_r)}{dt} \cdot \rho_{NF} \right]$$

Ahora de la ec. (7.168) tenemos que

$$\frac{dB_P}{dt} = -\frac{B_P - B_{P0}}{\tau} = \frac{\alpha_{NF} \cdot A_P}{4} \left[ \frac{d(\rho_{NF})}{dt} \cdot h_r + \frac{d(h_r)}{dt} \cdot \rho_{NF} \right] \quad (7.181)$$

De esta última relación podemos despejar el tiempo de relajación ( $\tau$ )

$$\tau = -\frac{4(B_P - B_{P0})}{\alpha_{NF} \cdot A_P \cdot [\dot{\rho}_{NF} \cdot h_r + \dot{h}_r \cdot \rho_{NF}]} \quad (7.182)$$

De esta ecuación se ve que el tiempo de relajación es inversamente proporcional al aumento de la altura de las raíces y la densidad volumétrica de fertilizantes, así como del área de las plantas. Y es directamente proporcional la diferencia entre  $B_P$  y  $B_{P0}$ .

Como relacionamos esto con el flujo de nutrientes de la ec. (7.177) tenemos que

$$\frac{dB_P}{dt} = \alpha_{NF} \cdot \frac{d(NF)}{dt} = \alpha_{NF} \cdot j_{NFP} \quad (7.183)$$

el término  $j_{NFP}$  es el flujo de fertilizantes de la la superficie de la raíz a la planta. Este flujo como sabemos depende de un gradiente de concentración de fertilizante entre planta y el área de superficie de raíz. Este flujo se mantenido en estado estacionario mientras la concentración de fertilizante en la superficie de raíz se mantenga constante. Por lo tanto si dejamos de aplicar fertilizantes

$$J_{NFP} < 0 \quad (7.184)$$

es decir la cantidad de fertilizante en la superficie de raíz va disminuir hasta alcanzar la cantidad de fertilizante natural  $NF_{na}$ . Esto es gracias a que siempre que uno fertiliza éste se difunde del lugar de aplicación a la zona de raíz para ser tomado por ésta, pero parte de este difunde más allá de la zona de raíz acumulándose. Cuando dejamos de aplicar el fertilizante este acumulado más abajo de la zona de raíz empieza a difundirse hacia la superficie de la misma. Para ser absorbido durante un periodo este fertilizante sigue manteniendo a la planta a una productividad más alta que la natural, pero eventualmente este depósito llega al nivel natural, así la productividad de la planta retorna a su estado natural.

# Bibliografía

- [1] , *The Biology of Aging*, Edited by John A. Behnke, Caleb E. Finch, Gajrner B. Moment, Plenum Press, New York and London (1998).
- [2] A. A. Zotin, A. I. Zotin, *Thermodynamic Bases of Develomental Process*, J. Non-Equilib. Thermodyn. (1996) Vol. 26 (1196) No.4. pp. 307-320
- [3] Roland Glaser, *Biophysics*, Springer, 1° edition, (1996).
- [4] Nicolis. G y Prigogine. I, *Self-Organization in Nonequilibrium Systems (From Dissipative Structures to Orden Trough Fluctuations*, Jonh Wiley & Sons, (1977). pag. England.
- [5] Ingolf Lamprecht y A. I. Zotin (Eds). *Thermodynamics of Biological Process*, W de G de Gruyter, Berlin (1978).
- [6] A. G. Guyton, *Textbook of Medical Physiology*, W. B. Saunders Co. Phil. (1976), Primera Edición, pp. 952
- [7] Raul Robles Sanchez, *Producción de Oleaginosas y Textiles*, Ed. Limusa, (1982), pp. 108-111
- [8] PETER B. REICH, MICHAEL B. WALTERS, AND DAVID S. ELLSWORTH, *From tropics to tundra: Global convergence in plant functioning*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol. 94, pp. 13730-13734, December (1997), Ecology.
- [9] LEONARD GUARENTE, GARY RUVKUN, AND RICHARD AMASINO, *Aging, life span, and senescence*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol. 95, pp. 11034-11036, September (1998), From the Academy.
- [10] James W. Haefner, *Modeling Biological Systems Principles and Aplications*, CHAPMAN & HALL, ITP New York, (1996).
- [11] Larcher, *Physiology Plant Ecology*, 3° Springer, (1995)

## Capítulo 8

# Conclusiones

En este trabajo de tesis la aplicación de la Termodinámica de Procesos Irreversibles a Ecosistemas, Agroecosistemas y a Estructuras Biológicas Disipativas ha conducido a los siguientes resultados:

1) Tiempo de vida útil de una estructura disipativa

A partir de un análisis termodinámico irreversible acerca de la cantidad de generación de entropía específica de un sistema disipativo a lo largo de su vida útil se encuentran los siguientes resultados:

Una expresión de carácter general para todo sistema disipativo biológico y no biológico, relaciona inversamente la duración del sistema con su Tasa Metabólica Específica o función disipación de Rayleigh. Un caso particular de la expresión obtenida permite describir los datos experimentales que existen para la vida máxima de especies de mamíferos como función de su Tasa Metabólica Específica.

2) Se encuentra expresión para el daño funcional y el funcionamiento remanente porcentual de una estructura disipativa.

3) Se encuentra una expresión para el tiempo de vida como función del incremento medio, de la Tasa metabólica Específica del organismo respecto a su Tasa Metabólica Específica mínima que describe la máxima duración de vida para la especie correspondiente. Esta expresión se puede aplicar a un órgano específico, lo cual en principio aporta una herramienta teórica para el estudio del envejecimiento acelerado local.

4) Se encuentra una expresión que permite comprender el proceso de envejecimiento de una célula dentro de un organismo multicelular. La ecuación en cuestión exhibe de forma clara que en cada ciclo funcional de la célula, se produce un aumento constante de entropía la cual no puede ser expulsada o descargada. Este aumento acumulativo en la entropía de la célula; el cuál va dificultando de manera creciente el procesamiento de la energía libre por parte de la célula hasta que ocurre un colapso total del sistema.

5) Se encuentra una expresión en la cual la Tasa Metabólica total de un ser vivo se puede dividir en distintas tasas metabólicas de acuerdo al uso de la energía consumida.

6) En el marco previamente desarrollado se analizan las etapas del desarrollo biológico de

un ser vivo. En particular nuestro análisis arroja nueva luz sobre la etapa del envejecimiento y el colapso final de un ser vivo; así como la parte de desarrollo fetal.

7) Se analiza teóricamente el efecto de la radiación  $\gamma$  de Cobalto 60 sobre semillas de ajonjolí en su germinación y crecimiento posterior. El modelo describe resultados experimentales.

8) Se describen los resultados experimentales para el envejecimiento de 280 hojas de plantas diferentes de la misma especie

9) **Ecosistemas.** Se modela a un ecosistema general (formado por plantas, animales y hongos) microscópicamente y en forma abstracta a nivel de

9.1.a) De la descripción a través del tiempo, del ecosistema en su conjunto con el uso del ritmo metabólico medio,  $\theta$ , y su masa total  $M$ , se encuentra una expresión que afirma que para tiempos cercanos al tiempo al cual comenzó la existencia del ecosistema el ritmo metabólico del mismo crece exponencialmente con el tiempo; la expresión encontrada sirve para describir zonas boscosas después de un incendio grande, o la formación de un ecosistema en una nueva isla de origen volcánico, etc. También se observa que tiene la misma estructura matemática de la masa y el ritmo metabólico de un feto humano a través del tiempo.

9.1.a) Se encuentra la condición que se debe cumplir durante el estado estacionario.

9.1.b) Se analiza el periodo de decaimiento del estado estacionario asociado a un cambio fuerte en las condiciones climáticas (como cambios en la precipitación pluvial o la temperatura del medio ambiente, etc). La respuesta del sistema cuando los cambios son pequeños una disminución del ritmo metabólico del ecosistema lineal en el tiempo. Esta expresión tiene la misma estructura matemática que el ritmo metabólico humano a través del tiempo durante la etapa del envejecimiento (en la cual el organismo tiene dificultades crecientes para asimilar los nutrientes que toma del exterior).

La respuesta del sistema cuando los cambios son grandes o rápidos, también se encuentra y se puede expresar matemáticamente como un decremento exponencial con el tiempo del ritmo metabólico medio del ecosistema. Esta expresión, indica lo que ocurre en un cultivo en una zona desértica cuando dejara de ser regada; También se aplica a un pequeño jardín que no se riega por meses en temporada seca; y describe lo que sucedería cuando por cualquier motivo de alcance global-planetario del suelo por ejemplo debido a un invierno nuclear (producto de una guerra nuclear-global).

9.2) Análisis mecanístico a detalle; pero a un a nivel abstracto, del ritmo metabólico del ecosistema aporta los siguientes resultados:

9.2.a) Se plantea la existencia de un vector  $r$ -dimensional para describir la población total del ecosistema tanto por su especie, como por el número de individuos de cada especie. El vector generalizado abarca los tres seres vivos en la Tierra; plantas, animales y hongos.

9.2.b) La condición de que las formas de expresión del ritmo metabólico, del ecosistema, fenomenológica y mecanicista coincidan, permite encontrar los siguientes resultados:

a) el vector de estructura poblacional del ecosistema es constante en estado estacionario en esencia implica la existencia de una ecuación de continuidad, generalizada, para cada especie del ecosistema. La interpretación física de cualquiera de estas ecuaciones de continuidad es la siguiente: cuando ocurre una perturbación en el valor de  $n_i$  de la población de la especie  $i$  respecto a su valor de estado estacionario, esta misma variación induce flujos en todas la otras  $n_j$  ( $i \neq j$ ) los cuales tienden a restaurar el valor de estado estacionario de  $n_i$ . En otras palabras

el sistema obedece el principio generalizado Lechatelier-Brown; o como se le conoce en medicina el principio de homeostasis.

9.2.c) Se encuentra una expresión para la generalización del ecosistema, la cual se exhibe como la suma de las contribuciones a la generación de cada especie que forma el ecosistema.

10) Modelo mecánico de un ecosistema simple, sobre la base de considerar un ecosistema idealizado formado por un sistema llamado plantas, otro llamado animales y uno más llamado hongos, así como otros dos llamados respectivamente descompositores y bacterias fijadoras de nitrógeno; y considerando dos subsistemas abióticos el suelo y la atmósfera ( los dos incluyen agua) se llegó a los siguientes resultados:

10.1) Ecuaciones de balance de energía y producción de entropía para cada uno de los sistemas bióticos.

10.2) Se realiza un análisis termodinámico comparativo entre un Agroecosistema y un Agrosistema.

11) Se analiza la respuesta de un cultivo ante perturbaciones de distinto tipo, con la intención de aportar una metodología que permita evaluar las posibles acciones correctivas o ecosistemas deteriorados.

11.1) Se desarrolla un modelo microscópico para el tiempo de relajación de un cultivo como función de los flujos de fertilizantes y nutrientes hacia la planta.