

*Luz do sol  
que a folha traga e traduz  
em verde novo,  
em folha, em graça,  
em vida, em força, em luz...*  
**Luz do sol**, Caetano Veloso<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Luz del sol / que la hoja sorbe y convierte / en verde nuevo / en hoja, en gracia / en vida, en fuerza, en luz...



# Capítulo 1

## Bioenergía y biocombustibles

*La conversión de energía solar en energía química, que se realiza en los vegetales durante la fotosíntesis, es uno de los fenómenos más fascinantes de la naturaleza. En la planta iluminada por el sol, la fugaz radiación solar se transforma en productos estables, absolutamente esenciales a la vida en nuestro planeta. Y, desde el principio de la humanidad, fue la simbiosis con el mundo vegetal lo que garantizó el suplemento de alimentos, energía y materias primas de amplio uso, permitiendo, a lo largo de milenios, que aumenten los niveles de bienestar y productividad económica. Tras la breve interrupción en los últimos siglos, durante los cuales la energía solar fosilizada pasó a ser ambiciosamente explotada y utilizada, en forma de carbón, petróleo y gas natural, la energía fotosintética vuelve, lentamente, a ser la protagonista principal. Capaz de mitigar preocupantes problemas ambientales, la energía fotosintética le brinda una nueva dinámica al mundo agroindustrial y ofrece una alternativa efectiva a la necesaria evolución de la sociedad industrial moderna hacia un contexto energético más sostenible y racional. Sin pretender ser la solución exclusiva, la captación y el almacenamiento de energía solar en los vegetales pueden desempeñar un rol destacado en el futuro energético de las naciones. De hecho, como ya decía Melvin Calvin – Premio Nóbel de Química en 1961 por sus descubrimientos sobre la fotosíntesis-, las hojas son verdadera “fábricas silenciosas”.*

*Este capítulo inicial está dedicado a los conceptos básicos y a la evolución de la bioenergía, particularmente a los biocombustibles, con una perspectiva de largo plazo. Posteriormente, se abordarán más detalladamente la expansión y las perspectivas actuales del mercado brasileño de bioetanol y del mercado mundial de biocombustibles.*



## 1.1 Fundamentos de la bioenergía

En su acepción más rigurosa, la energía es la capacidad de realizar cambios, presentada bajo diferentes formas, como la energía térmica, la energía eléctrica y la energía química, pero siempre representando un potencial para causar transformaciones, ya sean naturales o determinadas por el ser humano. La energía química es la forma de energía que se genera a través de reacciones químicas en las que tienen lugar cambios de composición, transformándose los reactivos en productos, generalmente con liberación de calor. Por ejemplo, la energía química está disponible en los alimentos y en los combustibles, y se usa en los procesos vitales de los animales y de las personas, así como para mover vehículos, entre otros fines.

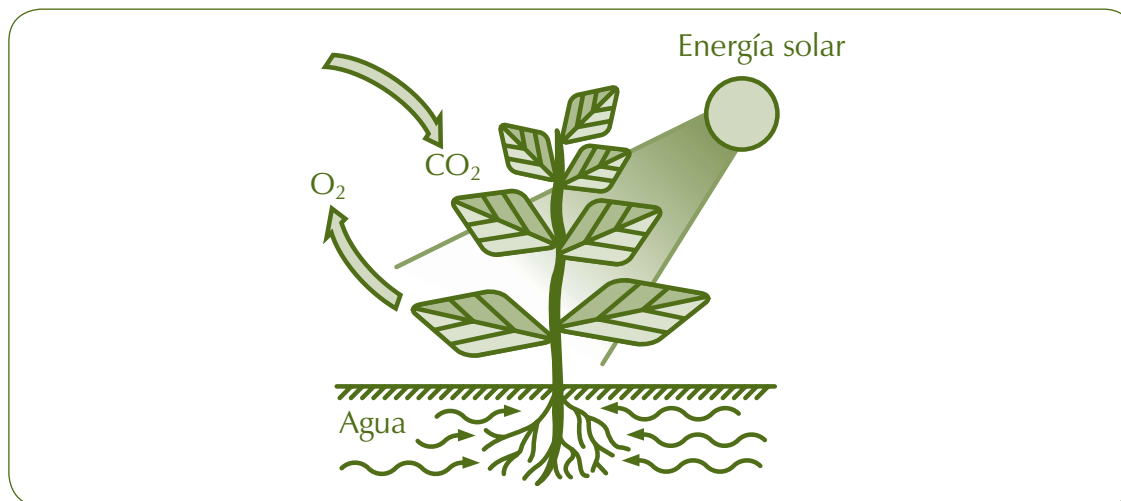
Un caso particular de energía química es la *bioenergía*, que se puede definir como cualquier forma de energía asociada a formas de energía química acumulada mediante procesos fotosintéticos recientes. En general, se denomina *biomasa* a los recursos naturales que poseen bioenergía y que se pueden procesar para obtener formas bioenergéticas más elaboradas y adecuadas para el uso final. Por lo tanto, serían ejemplos de fuentes de bioenergía la leña y los residuos de aserraderos, el carbón vegetal, el biogás resultante de la descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos y otros residuos agropecuarios, así como los biocombustibles líquidos, como el bioetanol y el biodiésel, y la *bioelectricidad*, generada por la quema de combustibles como el bagazo de caña y la leña.

En el amplio contexto de la bioenergía, la producción de biocombustibles líquidos sirve para atender particularmente las necesidades de transporte automotor. Para estos fines, además de los biocombustibles, aún no existen, en la actualidad, otras alternativas renovables con madurez tecnológica y viabilidad económica suficientes. Los biocombustibles líquidos se pueden utilizar de manera bastante eficiente en motores de combustión interna que equipan los más diversos vehículos automotores y que se clasifican básicamente en dos tipos, dependiendo de la manera como inicia la combustión. Motores del ciclo Otto, con ignición a chispa, para los cuales el biocombustible más recomendado es el bioetanol; y motores del ciclo Diesel, en los cuales la ignición se logra por compresión y que pueden utilizar con buen desempeño el biodiésel. En ambas situaciones, los biocombustibles pueden ser usados puros o mezclados con combustibles convencionales derivados de petróleo. Es interesante observar que, en los primeros años de la industria automotriz, durante la segunda mitad del siglo XIX, los biocombustibles representaban la principal fuente de energía para los motores de combustión interna, con el uso del bioetanol por Henry Ford y del aceite de maní, por Rudolf Diesel. Estos dos productos se reemplazaron, respectivamente, por la gasolina y el diésel a medida que los combustibles derivados de petróleo pasaron a ser abundantes y baratos, a partir del comienzo del siglo pasado. Los aspectos técnicos asociados al uso de etanol en motores se comentarán en el próximo capítulo.



Automóvil Ford Modelo A (1896) para etanol puro.

### Figura 1 – El proceso de fotosíntesis



Fuente: Elaboración de Luiz Augusto Horta Nogueira.

La producción de biomasa, como resultado de la reacción de fotosíntesis, depende esencialmente de la energía solar y de la presencia de agua y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), y tiene lugar en las células vegetales de los estomas de las hojas, según complejos ciclos que pueden ser representados por la siguiente expresión, en la cual agua y dióxido de carbono se combinan para formar una molécula de glucosa (un azúcar simple) y oxígeno.



En esta reacción, en términos energéticos, la formación de 1 Kg de azúcar corresponde a la fijación de cerca de 17,6 MJ (mega joules) de energía solar, equivalente a cerca de medio litro de gasolina. Por balance de masa de esta reacción, se sabe que la síntesis de 1 Kg de glucosa consume cerca de 0,6 Kg de agua y 1,4 Kg de dióxido de carbono, liberando a la atmósfera 1 Kg de oxígeno. Naturalmente, esta agua representa sólo la parte utilizada en la composición del azúcar, pues durante su crecimiento y, en particular, durante la fotosíntesis, se produce evapotranspiración y el vegetal necesita agua en volúmenes centenas de veces mayor que la cantidad fijada en el producto vegetal. Así, la condición fundamental para producir biomasa y, por ende, de bioenergía es la disponibilidad de radiación solar, agua y dióxido de carbono.

Entre estos factores de producción básicos para la producción vegetal, el dióxido de carbono es el menos problemático, pues está bien distribuido en la atmósfera, en concentraciones suficientes para las plantas. Sin embargo, es relevante observar que su concentración muestra, en las últimas décadas, un preocupante crecimiento principalmente asociado al uso intensivo de combustibles fósiles, capaz de incrementar el efecto invernadero en la atmósfera terrestre y el consecuente calentamiento global. En este sentido, los biocombustibles presentan dos importantes ventajas: su uso permite reducir la emisión de carbono a la atmósfera y, además, la producción de biomasa es potencialmente favorecida, dentro de ciertos límites y para algunas especies, por la creciente disponibilidad de dióxido de carbono en la atmósfera.

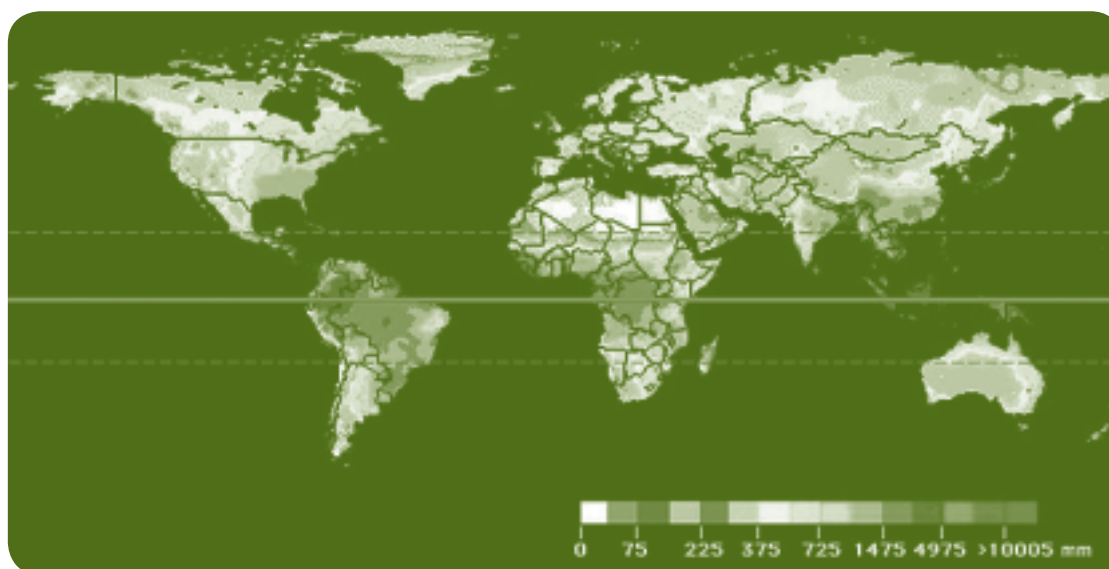
Con relación a la radiación solar, interesa conocer cuál es la fracción utilizada por las plantas y cómo está disponible en el planeta. La fotosíntesis se realiza con absorción de luz por la clorofila en bandas específicas del espectro solar, especialmente para las longitudes de onda entre 400 y 700 nm, región del color rojo. En fisiología vegetal, esta banda se conoce como radiación fotosintéticamente activa (PAR, del inglés *photosynthetically active radiation*) y corresponde, aproximadamente, al 50% del total de la radiación solar. Con relación a la disponibilidad de radiación solar, el factor primordial es la latitud, donde las regiones tropicales reciben más energía solar en comparación con las ubicadas en latitudes mayores. Según el Atlas Solarimétrico Brasileño, un área de un metro cuadrado, ubicada entre 10º y 15º de latitud sur, en la región norte de Brasil, recibe, más o menos, 18,0 MJ/día, mientras que, para una latitud entre 20º y 25º, en la región sur, la misma área recibe 16,6 MJ/día, cerca del 8% menos de energía [Cresesb (2000)]. También asociada a la latitud, la temperatura ambiente es otro factor que influye directamente en la fotosíntesis. Dentro de ciertos límites, mayores

temperaturas favorecen la producción bioenergética, reforzando la ventaja de las regiones más calurosas del planeta en este sentido.

El agua, el último de los factores esenciales para la fotosíntesis, constituye, de hecho, el gran limitante a considerarse para la producción vegetal. La reducida disponibilidad de recursos hídricos con adecuada calidad y su heterogénea distribución sobre los continentes configuran uno de los grandes retos para el desarrollo de muchas naciones. Extensas áreas soleadas en las regiones semiáridas pueden colaborar poco como fuente de biomasa sin ser irrigadas con volúmenes significativos de agua, implicando costos siempre muy elevados y, con frecuencia, dispendios energéticos que dificultan la producción bioenergética. A escala mundial, la irrigación consume actualmente más del 70% de los recursos hídricos utilizados y responde por cerca del 40% de la producción agrícola, transformando el acceso al agua en un tema de enorme prioridad [Horta Nogueira 2008)]. Además, los posibles cambios climáticos derivados del aumento del efecto invernadero en nuestro planeta tienden a modificar de manera preocupante los regímenes pluviales e hídricos, ampliando los riesgos de fenómenos críticos, como sequías e inundaciones, que, evidentemente, afectan la producción vegetal de modo negativo.

Según lo representado en la Figura 2, algunas regiones tropicales, en particular en Sudamérica y África, presentan significativa disponibilidad pluvial. Aunada a una mayor incidencia de energía solar y a temperaturas adecuadas, ésta es una ventaja relevante que configura, en dichas regiones, las condiciones más favorables para producir bioenergía, cuyo fomento debe realizarse en armonía con los bosques naturales y la agricultura ahí existentes.

**Figura 2 – Pluviosidad media anual**

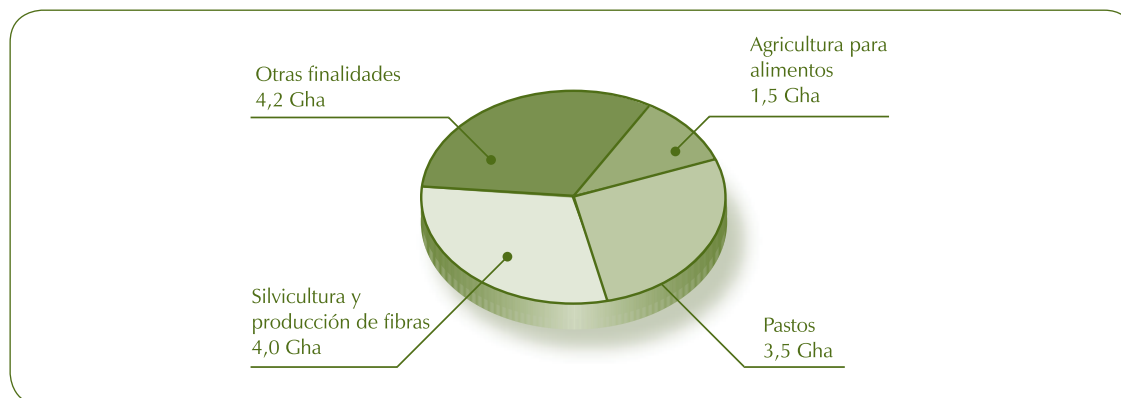


Fuente: FAO (1997).

Además de los factores básicos (luz, agua y dióxido de carbono), otros requisitos importantes para la producción bioenergética son la fertilidad del suelo y la topografía. Los principales nutrientes minerales para el crecimiento vegetal son nitrógeno, fósforo y potasio, pero también es decisiva la disponibilidad, en menores concentraciones, de otros minerales, como boro, manganeso y azufre, así como la presencia de materia orgánica. Adicionalmente, un suelo fértil se caracteriza por la adecuada estructura y porosidad. De modo general, los cultivos bioenergéticos precisan de fertilizantes químicos para lograr niveles satisfactorios de productividad, cuyo mantenimiento depende además del manejo adecuado de los suelos, especialmente la mecanización en las operaciones agrícolas. Con relación a la topografía, la inclinación de las áreas de cultivo no debe ser muy grande, para reducir la incidencia de procesos erosivos, principalmente en los cultivos de ciclo anual, así como para facilitar las operaciones de cultivo y cosecha.

La consideración conjunta de todos estos factores delimita el área potencialmente cultivable para bioenergía y todos los demás usos. Considerando todo el planeta, esa área está estimada en 13,2 mil millones de hectáreas, de las cuales son actualmente utilizadas para producir alimentos para humanos y animales cerca de 1,5 mil millones de hectáreas, correspondientes al 11% del total [Hoogwijk et al. (2003)]. Adelantando un tema que será analizado con más detalles en el Capítulo 8, el Gráfico 1 muestra cómo se distribuyen los usos de la superficie cultivable entre todos los continentes, señalando la existencia de áreas disponibles para expandir las fronteras agrícolas y la eventual producción de bioenergía, en especial en los sitios aún poco explotados o utilizados en forma extensiva, como en pastos de baja productividad.

**Gráfico 1 – Usos de la superficie cultivable en la Tierra**



Fuente: Elaboración en base a Hoogwijk et al. (2003).

Como uno de los parámetros elementales en sistemas bioenergéticos, es relevante conocer la eficiencia de los cultivos en los procesos de captación y almacenamiento de energía solar. Al determinar cómo y cuánto de la energía solar se transforma realmente en bioenergía y al comprender cómo ocurren las transformaciones y pérdidas de energía, es posible, eventualmente, obtener las condiciones más favorables para el desempeño de las plantas como

colectoras de energía. No obstante, recién en las últimas décadas se están elucidando los mecanismos bioquímicos que permiten que el vegetal sintetice azúcares y otros productos químicos, así como las vías de fijación del carbono identificando sus diferentes etapas, que se desarrollan según una secuencia compleja de reacciones sucesivas, con diversas bifurcaciones y compuestos inestables hasta formar sustancias estables, denominadas *ciclos fotosintéticos*. Tal conocimiento devela una nueva e importante frontera de posibilidades para comprender el comportamiento de las plantas y, eventualmente, incrementar la productividad de las especies de potencial bioenergético.

Los ciclos fotosintéticos de mayor interés son el ciclo de Calvin, o ciclo C3, y el ciclo Hatch-Lack, o ciclo C4, en que la molécula del primer producto estable producido presenta, respectivamente, tres carbonos (ácido fosfoglicérico) o cuatro carbonos (productos como oxalacetato, malato y aspartato) [Hall y Rao (1999)]. Mientras la mayoría de las plantas conocidas utiliza el ciclo C3, en algunas gramíneas tropicales, como caña de azúcar, cebada y sorgo, se identificó el ciclo C4. Tal distinción es relevante para desarrollar sistemas bioenergéticos, en función de la gran diferencia de productividad entre tales ciclos a favor del ciclo C4, que presenta una elevada tasa fotosintética de saturación (absorbe más energía solar), ausencia de pérdidas por fotorrespiración, alta eficiencia en la utilización del agua, mayor tolerancia salina y bajo punto de compensación para el CO<sub>2</sub>, es decir, responde mejor bajo menores concentraciones de este gas. En resumen, se puede afirmar que los vegetales con ciclo C4 son los más aptos para la producción bioenergética. La Tabla 1 presenta una comparación de algunos parámetros de interés para estos dos ciclos fotosintéticos [Janssens et al. (2007)].

**Tabla 1 – Parámetros de desempeño vegetal para los ciclos fotosintéticos**

Característica	Especies C3	Especies C4
Razón de transpiración (kg de agua evaporada por kg sintetizado)	350 – 1000	150 – 300
Temperatura óptima para fotosíntesis (°C)	15 a 25	25 a 35
Lugar de la fotosíntesis	Toda la hoja	Parte externa de la hoja
Respuesta a la luz	Saturada para radiaciones medias	No saturada bajo radiaciones elevadas
Productividad anual media (t/ha)	~ 40	60 a 80
Aptitud climática	Templado a tropical	Tropical
Ejemplos	Arroz, trigo, soya, todas las fructíferas, oleaginosas y la mayoría de los vegetales conocidos	Maíz, caña de azúcar, sorgo y otras gramíneas tropicales

Fuente: Janssens et al. (2007).

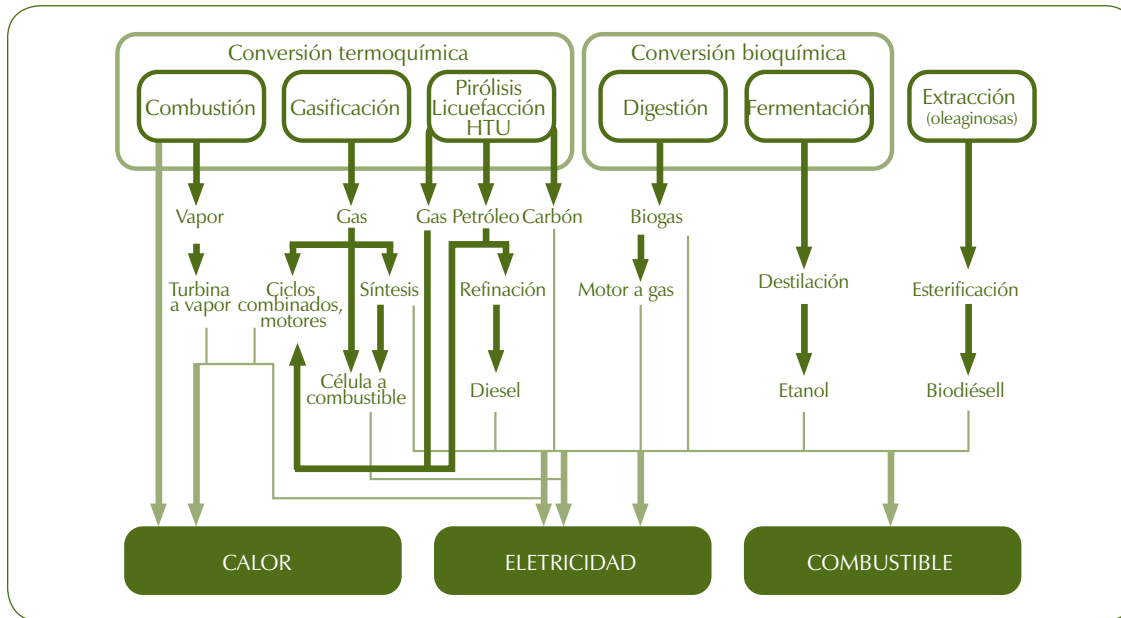
De la radiación solar incidente sobre la Tierra, de 178 mil TW (terawatt o mil millones de kilowatts), se estima que cerca de 180 TW, o el 0,1%, son utilizados en los procesos fotosintéticos, naturales o promovidos por los seres humanos. De este modo, en todo el planeta, son producidos anualmente cerca de 114 mil millones de toneladas de biomasa, en base seca, correspondiendo a, aproximadamente, 1,97 mil millones de TJ (terajoule o mil millones de kilojoules), a su vez equivalentes a 314 mil millones de barriles de petróleo o cerca de diez mil veces el actual consumo mundial de ese combustible fósil. En ese contexto, el promedio de la eficiencia de asimilación de la energía solar es inferior al 1%, aunque vegetales de mayor desempeño, como la caña de azúcar, puedan alcanzar un 2,5% en promedio anual [Smil (1991)]. Naturalmente, estos valores sirven sólo como referencia para entender la magnitud energética de la fotosíntesis. No tiene sentido imaginar la bioenergía como sustituta de todas las formas fósiles de suplemento energético, principalmente en los países de elevada demanda. Este crecimiento vegetal sucede, como se comentó, sobre todo en especies nativas de las regiones tropicales, estimándose que las actividades agrícolas corresponden a cerca del 6% de este total.

Es interesante observar que, dependiendo del vegetal, la energía solar se fija en diferentes sustancias y órganos de acumulación, que determinan las vías tecnológicas posibles de adoptar para convertirlo en biocombustibles para uso final. En la caña de azúcar, por ejemplo, las reservas energéticas se ubican principalmente en los tallos, como sacarosa, celulosa y lignina, siendo tradicionalmente empleadas en la producción de bioetanol y bagazo, pero también las puntas y hojas de la caña presentan creciente interés, a medida que se desarrollan procesos para la utilización de su substrato lignocelulósico. A su vez, en los árboles y otras especies leñosas, el contenido energético está esencialmente en el fuste (tronco más ramas), en forma de celulosa y lignina, siendo empleado básicamente como leña. Las raíces y tubérculos de plantas como la mandioca y la remolacha acumulan almidón y sacarosa, mientras que los frutos y las semillas, como la palma y el maíz, acumulan generalmente almidón, azúcar y aceites vegetales, según cada especie.

Además de definir las vías tecnológicas más adecuadas para convertir la biomasa en biocombustibles, estos aspectos son relevantes para la eficiencia global de captación y utilización de energía solar: para la síntesis de carbohidratos (como celulosa y sacarosa), el vegetal requiere cerca del 60% menos de energía que para la síntesis de grasas o lípidos [Demeyer et al. (1985)], por unidad de masa de producto final, lo que, en principio, hace las vías asociadas al biodiésel comparativamente menos eficientes que las vías del bioetanol, en base a la sacarosa o a la celulosa.

La Figura 3 presenta una síntesis de las diversas vías de conversión que se pueden aplicar para transformar la biomasa en biocombustibles y calor útil. Además de los procesos físicos, puramente mecánicos, para concentración, reducción granulométrica, compactación o reducción de la humedad de la biomasa, son utilizados dos grupos de tecnologías químicas, que modifican la composición de la materia prima para suministrar productos más compatibles con los usos finales: *procesos termoquímicos*, que emplean materias primas con baja humedad y temperaturas elevadas; y *procesos bioquímicos*, desarrollados en ambientes con elevada concentración de agua y temperaturas cercanas a la ambiente.

**Figura 3 – Vías tecnológicas para producción de bioenergía**



Fuente: Elaborado en base a Turkenburg et al. (2000), apud Seabra (2008).

## 1.2 Evolución de la bioenergía y de los biocombustibles

La bioenergía, en sus diferentes formas, fue la principal y, en algunas situaciones, la única forma de suplemento energético exógeno utilizada por la humanidad a lo largo de su historia. Desde las primitivas hogueras, hace más de 500 mil años, la biomasa leñosa fue la fuente energética por excelencia y atendía las necesidades domésticas de energía para cocción y calentamiento, además de proporcionar primitivos sistemas de iluminación que empleaban grasas vegetales y animales en quinqués y velas. Posteriormente y durante milenios, la producción cerámica y metalúrgica pasó a representar una demanda importante de bioenergía, consumida en hornos y forjas. Sólo a partir del siglo XVIII, se produjo el agotamiento de las reservas de leña disponibles en gran parte de Europa Occidental y, principalmente, en Inglaterra, factor determinante para comenzar la explotación del carbón mineral y que, junto a la máquina a vapor, fue uno de los hechos desencadenantes de la Revolución Industrial. Si no hubiera sido introducida la energía fósil en forma de carbón mineral, disponible en cantidad abundante y con acceso relativamente fácil en esa época, la historia moderna seguramente hubiera seguido otro rumbo.

Del Brasil colonial, tenemos un registro interesante de un proceso agroindustrial económicamente relevante, proporcionado por la energía de la biomasa. Según relata Antonil (1982), los ingenios de azúcar del Recôncavo Baiano (área alrededor de la Bahía de Todos los Santos), durante el siglo XVII, poseían

as fornalhas, que por sete meses ardem dia e noite, querem muita lenha... (pois) o alimento do fogo é a lenha, e só o Brasil, com a imensidade dos matos que tem, podia fartar, como fartou por tantos anos, e fartará nos tempos vindouros, a tantas fornalhas, quantas são as que se contam nos engenhos da Bahia, Pernambuco e Rio de Janeiro...<sup>1</sup>

Es curioso imaginar lo que dichos ingenios hacían entonces con el bagazo de las cañas procesadas – si lo empleaban para alimentar los bueyes de carroza o lo destinaban a otros fines –, pues este subproducto podría constituir una fuente de energía básica para el proceso productivo. Como sucede en las usinas de azúcar y bioetanol de hoy día, que no usan leña y aun así producen excedentes considerables de energía exportable en la forma de bagazo y electricidad.

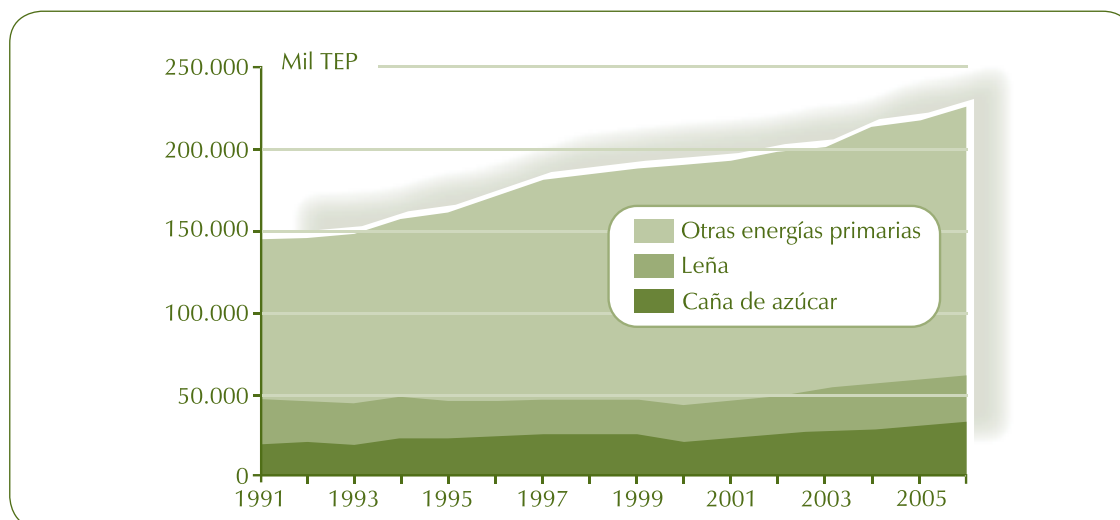
Como en otros países en desarrollo ubicados en regiones tropicales, la amplitud de los recursos bioenergéticos en Brasil ayuda a entender por qué, sólo después de 1915, los combustibles fósiles pasaron a ser utilizados con alguna relevancia en el país, donde la leña permaneció más importante que el petróleo en el suplemento energético hasta 1964 [Dias Leite (2007)]. Sin duda, en muchos ferrocarriles brasileños, que eran casi la única forma de transporte de carga de medianas distancias, así como en las embarcaciones de la Amazonia y en las jaulas (embarcación fluvial a vapor) del Río São Francisco, e incluso para generar energía eléctrica en sistemas aislados utilizando locomotores (conjuntos de máquinas a vapor simples y calderas de pequeña envergadura), la leña era el único combustible empleado hasta mediados del siglo XX. El Gráfico 2 muestra cómo evolucionó la oferta interna de energía en Brasil en las últimas décadas y cuál fue la contribución de la bioenergía, separándose las partes debidas a la caña y a la leña. En 2007, estas fuentes de bioenergía correspondieron, respectivamente, al 16,0% y 12,5% del consumo total de energía en el país [MME (2008)].

Los datos referentes a la bioenergía y, particularmente, a la parte de la leña en las estadísticas energéticas están, para la mayoría de los sectores, determinados en forma indirecta, en base a indicadores como la producción de la industria de papel y pulpa y el número de cocinas a leña. Recientemente, la Empresa de Investigación Energética (EPE) ha revisado esta metodología, buscando mejorar la consistencia de estas informaciones en el caso brasileño. De todos modos, investigaciones del Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE) demuestran que la leña sigue siendo un combustible importante a nivel doméstico. En más de 50 millones de viviendas brasileñas, cerca de un 3,5% cocinan sólo con biomasa y más del 14% usan

<sup>1</sup> N. del T. : “los hornos, que por siete meses queman día y noche, quieren mucha leña... (pues) el alimento del fuego es la leña, y sólo Brasil, con la inmensidad de matorrales que tiene, podría satisfacer, como satisfizo por tantos años, y satisfará en tiempos venideros, a tantos hornos, como son los que se encuentran en los ingenios de Bahía, Pernambuco y Río de Janeiro... “

simultáneamente leña y gas licuado de petróleo [IBGE (2005)]. En la agroindustria (lácteos, carnes, dulces), en general, y en la industria cerámica, especialmente las pequeñas y medianas, la leña es el principal energético, cada vez más producida en base a la silvicultura, en una cadena energética que amplía la generación de valor en el medio rural.

**Gráfico 2 – Participación de la bioenergía en la oferta interna de energía en Brasil**



Fuente: MME (2007).

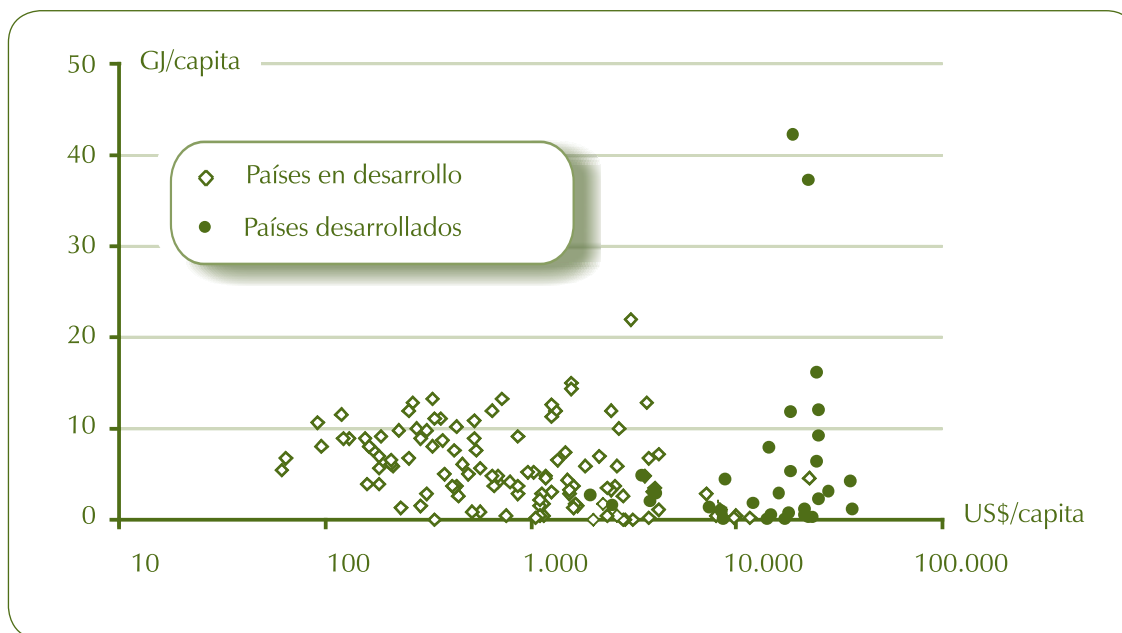
Se estima que las plantaciones forestales para fines económicos en Brasil cubren 4,1 millones de hectáreas, de las cuales cerca de la mitad está destinada a fines energéticos, principalmente para producir carbón vegetal [FAO (2006)]. Esta superficie reforestada se está expandiendo, anualmente, cerca de 250 mil hectáreas y presenta productividades energéticas interesantes, asociadas a un significativo desarrollo de las tecnologías en silvicultura. Aunque una parte importante de la producción de carbón vegetal, efectuada principalmente en la Amazonia occidental, y una parte de la demanda industrial en el interior del noreste todavía se basan en la tala y en la explotación predatoria de formas nativas, de manera general, el uso de leña en Brasil presenta buenos indicadores de sostenibilidad en sus varias vertientes [FAO (2007a)].

En términos globales y actualizando los datos de la Agencia Internacional de Energía (AIE), la demanda de energía comercial (es decir, que pasó por los mercados energéticos), en 2007, fue de 470 millones de GJ, correspondiendo a cerca de 82 mil millones de barriles de petróleo en un año [Best et al. (2008)]. De este consumo total, aproximadamente un 88% se obtuvo de recursos fósiles, especialmente carbón mineral y petróleo. El resto se obtuvo mediante bioenergía, energía hidroeléctrica, energía nuclear y, en menor grado, otras fuentes, como energía geotérmica y energía eólica, destacándose la bioenergía como la más importante entre las energías renovables. La bioenergía, cuyo aporte anual (comercial y no comercial) está estimado en 45 millones de GJ [Best et al. (2008)], se puede encontrar en las cocinas a leña

de gran parte de las viviendas de todo el mundo, en las calderas de muchas agroindustrias y en los tanques de combustibles de un número creciente de vehículos, sobre todo en los países industrializados.

De este modo, los sistemas bioenergéticos presentan una marcada dicotomía entre dos grandes y diferenciados paradigmas. En el primer caso, se encuentran los sistemas tradicionales, practicados hace miles de años, en los cuales la explotación de los recursos de biomasa se realiza bajo un esquema extractivista, sin adecuada valoración económica de los productos y, en general, por medio de sistemas de baja eficiencia y menor productividad, atendiendo a necesidades residenciales y de industrias tradicionales. Como ejemplos de este paradigma está la utilización de leña para la cocción doméstica en el medio rural, práctica común sin impactos notables, y la producción de carbón vegetal asociada a la tala de árboles, dañina y destinada a desaparecer. Como segundo paradigma, se encuentran los sistemas innovadores y modernos de bioenergía, en que la producción se produce generalmente de manera comercial, por medio de tecnologías eficientes, incluso desde el punto de vista ambiental, buscando atender las necesidades de energía de la moderna industria, del sector de transporte y la generación de electricidad. Para este caso, se pueden citar como ejemplos las cadenas bioenergéticas del bioetanol de caña de azúcar, del biodiésel de palma o de sebo, de la bioelectricidad producida con bagazo, licor negro o lixiviado celulósico, entre otras.

**Gráfico 3 – Contribución de la bioenergía en función de la renta per capita**



Fuente: FAO (1998).

Esta doble realidad se evidencia en el Gráfico 3, en el que se relaciona el consumo bioenergético (esencialmente en base a recursos leñosos) *per capita* con la renta *per capita* para diversos países. Si se toman solamente los puntos claros, correspondientes a los países en desarrollo, donde predominan las formas tradicionales de bioenergía, se puede afirmar que el crecimiento de la renta conduce a una reducción de la demanda bioenergética o, dicho de otra manera, que el uso de la bioenergía es una característica de las naciones pobres. Sin embargo, tal hipótesis no se confirma al incluir el análisis los países industrializados, correspondientes a los puntos oscuros, donde, incluso para rentas elevadas, la demanda de bioenergía puede ser relevante, alcanzando niveles superiores a los demás países.

Como ejemplos notables de países de elevado consumo energético y ubicados en regiones frías, de baja insolación y, por lo tanto, de baja productividad fotosintética, pero que logran producir de forma sostenible volúmenes importantes de bioenergía, Suecia y Finlandia obtienen de la fotosíntesis, respectivamente, 19% y 20% de su demanda energética total [Hall y Scrase (2005)]. Como otro ejemplo notable, estudios de los Departamentos de Energía y Agricultura de los Estados Unidos indican para 2030 una producción anual de biomasa para fines energéticos e industriales del orden del mil millones de toneladas (base seca), capaz de reducir en un 30% la demanda prevista de petróleo [DOE/USDA (2005)]. En estos casos, como en la moderna producción de biocombustibles, la bioenergía se concibe bajo modernas tecnologías de producción y conversión, atendiendo a premisas de sostenibilidad y siendo reconocida como una forma renovable de suplemento energético [FAO (2001)].

A escala mundial, por tanto, la evolución futura de la bioenergía presenta una tendencia de reducción de la contribución de las bioenergías tradicionales, a ser mantenidas circunscritas a las situaciones de menor impacto, mientras que las bioenergías modernas se expanden, ocupando el espacio de las fuentes energéticas fósiles. De esta forma, la bioenergía, progresivamente, deja de ser considerada una energía “antigua” y pasa a ser reconocida como una forma energética moderna, competitiva y adecuada, en condiciones de proporcionar una nueva revolución tecnológica. Como profetiza Sachs (2007):

La bioenergía es sólo una parte de un concepto más amplio de lo que se llama desarrollo sostenible, un concepto que se basa en el trípode de biodiversidad, la biomasa y la biotecnología y que puede servir de palanca para el lugar que la biomasa podrá representar en las próximas décadas.

