



DOCUMENTO DE SÍNTESIS

Contratación nº 2/11: Consultor internacional para el "Análisis del Estado del Arte a nivel del sector forestal con una perspectiva global Informe final"

PROYECTO PROBIO: Generación eléctrica a
partir de biomasa. URU/10/G31

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
URUGUAY

Montevideo, Uruguay



1	OBJETO DEL ANÁLISIS	1
1.1	Objeto y justificación	1
1.2	Entrevistas giradas	1
2	HACIA EL APROVECHAMIENTO DE LOS SUBPRODUCTOS DEL BOSQUE	3
2.1	Los recursos energéticos de los bosques	3
2.2	El manejo de la humedad	5
2.3	Revisión de los Sistemas de Aprovechamiento Forestal maderero en el Uruguay	6
2.3.1	EL SISTEMA DE APROVECHAMIENTO CUT TO LENGTH (CTL)	7
2.3.2	EL SISTEMA DE APROVECHAMIENTO FULL-TREE (FT)	8
2.3.3	VENTAJAS Y DESVENTAJAS COMPARATIVAS DEL SISTEMA CTL VS. EL SISTEMA FT	9
3	SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO INTEGRALES DE MADERA-BIOMASA	11
3.1	Propuesta de Sistemas de Aprovechamiento de la biomasa residual (Mejores Prácticas Disponibles) aplicables en el Uruguay	12
3.1.1	MODELOS COMPATIBLES CON EL SISTEMA CTL ENCORTAS FINALES	13
3.1.2	MODELOS COMPATIBLES CON EL SISTEMA FT ENCORTAS FINALES	19
3.1.3	MODELOS COMPATIBLES CON EL SISTEMA CTL EN RALEOS COMERCIALES	20
3.1.4	MODELOS COMPATIBLES CON EL SISTEMA FT EN RALEOS	22
3.1.5	OTROS SISTEMAS EN CORTAS FINALES	25
3.2	Algunas claves para la adaptación de las tecnologías forestales actuales del Uruguay a la valorización energética de los residuos forestales	28
3.2.1	LA APLICACIÓN DE LOS MODELOS PARA LA BIOENERGÍA EN EL URUGUAY	29
3.3	Los costes de la cadena logística de la bioenergía	30
4	SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL	32
4.1	Calidad del recurso suelo	32
4.1.1	IMPACTO EN EL CICLO BIOGEOQUÍMICO Y SOBRE LA QUÍMICA DE LOS SUELOS	32
4.1.2	INDUCCIÓN DE PROCESOS EROSIVOS	35
4.1.3	RIESGOS DE COMPACTACIÓN	36
4.2	Calidad de los recursos hídricos	36
4.3	Balance de carbono	37
4.4	Sanidad y autodefensa contra incendios forestales	38
5	LOS DIFERENTES ESCENARIOS EN EL URUGUAY	39
5.1	Subsistemas Forestales generadores de biomasa forestal residual	39
5.1.1	LOS EUCALIPTARES PARA CELULOSA EN EL LITORAL	39
5.1.2	LOS EUCALIPTARES PARA FIBRA EN EL SURESTE	40
5.1.3	LOS PINARES Y EUCALIPTARES PARA MADERA SÓLIDA EN EL CENTRO-NORTE	40
5.2	Tendencias probables ante estas realidades	42
5.2.1	LOS DESARROLLOS ENERGÉTICOS EN EL LITORAL	42
5.2.2	LOS DESARROLLOS ENERGÉTICOS EN EL SURESTE	43
5.2.3	LOS DESARROLLOS ENERGÉTICOS EN EL CENTRO-NORTE	43

6 BARRERAS IDENTIFICADAS Y RIESGOS: MEDIDAS PARA PROMOVER EL USO DE LA BIOENERGÍA	45
6.1 Evaluación de las externalidades ambientales	45
6.2 Curva de aprendizaje: Ausencia de modelos de manejo adaptados	46
6.3 El marco normativo regulador	46
6.4 Capacitación y formación laboral	47
6.5 Necesidad de generar nuevo conocimiento científico	48
6.6 Compatibilidad con los Sistemas de Gestión Forestal Sostenible (GFS)	48
7 CONCLUSIONES	49
8 BIBLIOGRAFÍA	51

1 Objeto del Análisis

1.1 Objeto y justificación

El objeto de este Trabajo es la identificación de tendencias tecnológicas y de nuevas prácticas para el aprovechamiento de la biomasa forestal residual en el Uruguay con destino la generación de energía eléctrica.

A pesar de que la biomasa forestal residual está considerada como un recurso energético de gran interés, su desarrollo se enfrenta a tres cuestiones fundamentales:

- .. Desarrollo de tecnologías de aprovechamiento que conformen una cadena logística eficiente en costes. La biomasa forestal residual debe ser un combustible capaz de competir con el resto de los combustibles fósiles en los mercados energéticos.
- .. Aseguramiento de su sostenibilidad bajo los criterios estandarizados y aceptados internacionalmente de la Gestión Forestal Sostenible (GFS).
- .. Identificación de barreras técnicas, legales o de conocimiento que dificultan el desarrollo de la bioenergía con biomasa forestal residual.

Para ello a lo largo del informe se desarrollarán los siguientes aspectos:

- .. Descripción de las tecnologías utilizadas en el Uruguay para el aprovechamiento forestal con vista a la aplicabilidad energética de los sub productos del bosque.
- .. Identificación de las tecnologías de uso internacional con posibilidades de incorporación en el Uruguay.
- .. Establecer un conjunto de sistemas de aprovechamiento de la biomasa forestal con fines energéticos definidos como Mejores Prácticas Disponibles.
- .. Identificación de los posibles impactos negativos de los sistemas de aprovechamiento y las medidas preventivas para evitarlos así como las correctivas.

1.2 Entrevistas giradas

La elaboración de este Informe ha requerido la celebración de varias entrevistas con actores relevantes de la foresto-industria uruguaya a lo largo del mes de abril de 2013. Los actores pertenecen tanto al sector privado como a instituciones públicas.

Los actores han aportado una visión muy valiosa para identificar y definir las barreras a sortear para conseguir el desarrollo de la bioenergía de forma efectiva en el país (relacionados por orden alfabético):

- .. Agroempresa Forestal.

- CAMBIUM.
- COFUSA.
- Bioeléctrica de Tacuarembó.
- Dirección General Forestal (MGAP).
- Dirección General de Recursos Naturales Renovables (MGAP).
- Dirección Nacional de Energía (MIEM).
- Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA).
- Energía Limpia Paysandú-LIDERDAT S.A.
- Energía Renovable Tacuarembó- FENIROL S.A.
- EMBRAPA Florestas (Brasil).
- Facultad de Agronomía. Universidad de la República.
- Forestal Caja Bancaria.
- Forestal Atlántico Sur (FAS).
- FORESUR G.I.E.
- GERTIL S.A.
- INIA.
- LOGMA.
- Montes del Plata.
- Regions Timberland Group (RTG).
- Sociedad de Productores Forestales del Uruguay.
- SGS.
- TEYMA FORESTAL.
- UPM/Forestal Oriental.

2 Hacia el aprovechamiento de los subproductos del bosque

2.1 Los recursos energéticos de los bosques

Toda la biomasa forestal residual es en principio susceptible de ser empleada como bioenergía. Frente al concepto tradicional de *producción de madera comercial* hacia la que se orientaban todos los esfuerzos de la gestión forestal, se impone ahora el concepto del *árbol completo* para considerar también el resto de la biomasa leñosa en la gestión forestal.

En términos de bioenergía se suelen considerar las siguientes fracciones del árbol completo (balance de masas) en función de sus características como combustible:

- .. Tocones. El aprovechamiento energético de los tocones es posible y se practica regularmente en las replantaciones de los eucaliptares en España y en otros países. No obstante es un material contaminado con tierra y piedras, que necesita un procesamiento intenso antes de poder ser consumido en las plantas. Adicionalmente su aprovechamiento requiere una remoción intensa del suelo, lo cual puede estar contraindicado en muchas ocasiones por motivos de conservación de suelos.
- .. Corteza. Se considera un buen combustible aunque con un porcentaje elevado de cenizas. Su consumo es tradicional para usos térmicos y eléctricos en las plantas industriales que procesan madera con corteza, tanto para usos de madera sólida como celulosa.
- .. Copa o punta. Es la parte superior del tronco por debajo del diámetro mínimo maderable, típicamente por debajo de los 5 cm. Comprende tanto las ramas como las hojas, y su calidad e interés es variable en función de la especie de que se trate. Cuando por algún motivo se incrementa el diámetro mínimo maderable por encima de 5 cm en punta delgada, se incrementa sustancialmente el porcentaje de leño en la copa, y en estos casos se produce una mejora muy notable de su calidad como combustible.

Las copas de las coníferas suelen tener mayor proporción de biomasa que las copas de las frondosas, y con mayor proporción de leño, por lo que presentan en la mayoría de las ocasiones mayor calidad como combustible.

- .. Ramas y hojas. Corresponde a todas aquellas que no forman parte de la copa y que quedan en campo después del procesado (desramado y tronzado) de los troncos. Las ramas constituyen una fuente interesante de biomasa, especialmente cuando los cultivos forestales incrementan la edad de su turno y cuánto más ramosos sean los genotipos de partida. Típicamente es una biomasa mucho más interesante de aprovechar en pinares que en eucaliptares por su peso relativo en el total de la biomasa aérea.
- .. Troncos de madera provenientes de descartes. Durante el aprovechamiento de la madera una parte de los troncos no son aprovechados debido a que presentan daños o defectos (podredumbres, árboles muertos, flechas elevadas, bifurcaciones, etc.) en su madera que los hacen inservibles. Este material es de

muy alta calidad como combustible, y aunque normalmente se encuentra en pequeña proporción en el cómputo total de la biomasa forestal generada, contribuye notablemente a incrementar la calidad total del conjunto.



Foto nº 1: Biomasa residual generada en corta final CTL sobre plantación de *Pinus taeda*, propiedad de Caja Bancaria (Paysandú). Fuente: Dirección General Forestal.

Desde el punto de vista del aprovechamiento de la biomasa forestal residual es crítico conocer este balance de masas para la toma de decisiones. Aunque es necesario profundizar con líneas de investigación particulares sobre el conocimiento de los balances de masa en los cultivos forestales uruguayos, con la información disponible hoy día es posible una primera estimación de los mismos:

Tabla nº 1.
Balance de masas básico en los principales cultivos forestales del Uruguay

Clase Forestal	Fracciones (%)				TOTAL
	Madera sin corteza	Corteza	Copa y ramas	Descartes	
<i>Eucalyptus</i> para pulpa	80%	13%	5%	2%	100%
<i>Eucalyptus</i> para madera sólida	86%	9%	4%	1%	100%
<i>Pinus</i> en raleos	40%	10%	50%	-	100%
<i>Pinus</i> en cortas finales	55%	18%	25%	2%	100%

Fuente: elaboración propia.

A la vista de estos datos preliminares resulta evidente el gran potencial y oportunidad para la bioenergía que implica la actividad forestal maderera hoy en Uruguay.

2.2 El manejo de la humedad

La humedad de la biomasa forestal resulta tan crítica para su PCI (Poder Calorífico Inferior), que es el factor que determina su precio de mercado con gran diferencia sobre el resto de los factores que establecen su calidad. Considerando la madera, su PCS (Poder Calorífico Superior) es de aproximadamente 4.500 Kcal/Kg, variando ligeramente entre especies. Una biomasa puede incrementar como promedio un 38% su PCI al rebajar su humedad desde su estado verde, en torno al 50% (fresco recién cosechado), hasta el 35%, humedad común en el momento de su consumo en una planta de energía.

La humedad verde de la biomasa recién cortada se halla entre el 45-55%, y empieza a descender paulatinamente hasta alcanzar una humedad en equilibrio con el ambiente en el que se encuentra. Existe también una importante variación en la humedad de las distintas fracciones de la biomasa (ramas, corteza y tronco) y también una importante variación tanto en sentido radial como longitudinal del tronco.

Inicialmente el descenso de humedad es rápido, hasta que se alcanza el punto de saturación de fibras de la madera, en torno al 30-35% dependiendo de la especie, para seguir disminuyendo más despacio y alcanzar ese punto de equilibrio higroscópico donde se estabiliza en referencia a las condiciones ambientales. Dependiendo de las condiciones climáticas, ese punto de equilibrio suele estibar entre el 13-20% de humedad. La velocidad de secado hasta alcanzar el punto de equilibrio es muy variable y depende tanto de la humedad relativa del aire y del régimen de temperaturas y vientos, como de la especie, de cómo se ha acopiado la biomasa, del diámetro medio de las trozas y si éstas se han descortezado o no. En determinados climas este proceso de secado natural u oreo puede durar más de un año. En estos casos no es infrecuente que se den episodios de rehidratación de la madera durante las semanas más húmedas, revirtiéndose en parte el proceso.

Los factores que mayor influencia tienen sobre la humedad de la biomasa son:

- El tiempo transcurrido entre la cosecha y la utilización de la biomasa.
- La época del año en que se realiza la cosecha y por tanto las condiciones ambientales en las que la biomasa permanece en campo.
- Un conjunto de variables que incluyen el tipo de especie, el tamaño del material, tamaño de troza, presencia de corteza, posición en el fuste, etc.
- Asociados a estos factores se encuentran los que tienen que ver con el clima como: la temperatura, humedad relativa (déficit de presión de vapor), viento y precipitaciones.

A pesar de tratarse de un proceso más o menos lento, se puede mejorar la efectividad del secado natural. La práctica más habitual consiste en evitar el aprovechamiento de la biomasa en los meses más húmedos y fríos del año, ya que apenas se reducirá la humedad, e incrementar la actividad en los meses más cálidos y secos, en los que el secado natural opera rápidamente. Usualmente se aplica el secado natural hasta que la biomasa reduce su humedad hasta un determinado porcentaje, típicamente hasta el punto de saturación de fibras, y ya se consume en ese momento. Esto es normalmente lo más eficiente, ya que fuera de la época del año más propicia para el oreo, esperar a que se reduzca aún más la humedad no compensa con el tiempo que se necesita para conseguirlo. Otra práctica habitual consiste

en descortezar la madera, aunque esto no es recomendable cuando se piensa en bioenergía ya que se agrega un coste importante más al proceso en su conjunto que no queda justificado (además de que se dificulta la posibilidad de valorizar la corteza como combustible).

Una práctica más habitual consiste en dejar secar los árboles enteros, sin descopar, ya que la copa tiene un efecto beneficioso favoreciendo la extracción del agua de la madera. El oreo también tiene un efecto beneficioso para la calidad de la biomasa, ya que cuando se remueve para su extracción se caen parte de las hojas, que quedan en el monte, por lo que se incrementa la fracción leñosa en los residuos. Obviamente, se debe compatibilizar el oreo con el resto de la planificación forestal de la plantación en su conjunto. Tampoco resulta conveniente dejar la biomasa en el campo demasiadas semanas en el caso de que existan riesgos fitosanitarios o se obstaculicen otras operaciones selvicultura. Todos estos aspectos deben ser ponderados cuando se aplica el secado natural.

Aunque en el Uruguay se cuenta con experiencia en el secado natural de leñas para uso industrial y doméstico, no se conocen las prácticas más adecuadas para aplicar el secado natural a escala operativa para la biomasa forestal residual bajo las condiciones climáticas del país. Aunque es una técnica que ha mostrado su idoneidad en climas mucho más húmedos como en el norte de Europa. En España se utiliza habitualmente con buenos resultados, por lo que es preciso iniciar una línea de investigación que reporte pautas de manejo adecuadas de la humedad en el Uruguay para sus condiciones propias.

La alta humedad tiene adicionalmente un efecto negativo en los costes de la operativa del aprovechamiento de la biomasa, ya que obliga a que se manipule y se transporte más peso, con el consiguiente incremento de costes logísticos. El efecto combinado se puede resumir en que transportar biomasa húmeda implica transportar un producto de menos valor a mayor coste.

Una alta humedad es también perjudicial en el caso de que la biomasa se astille. La astilla húmeda pierde muy difícilmente su humedad y deviene en un medio muy apropiado para su degradación. Esta degradación ocurre mediante procesos biológicos aeróbicos y anaeróbicos que incluso pueden producir episodios de incendios por auto combustión. Por el contrario, la técnica de enfardado permite el secado natural de la biomasa dentro del fardo una vez conformado.

2.3 Revisión de los Sistemas de Aprovechamiento Forestal maderero en el Uruguay

Como consecuencia de la elevada demanda de madera mundial y de que prácticamente los cultivos forestales hoy día están orientados hacia su producción, la mayor parte de la bioenergía se fundamenta en los residuos forestales que se generan en ellos. Por lo tanto, resulta esencial conocer los Sistemas de Aprovechamiento de la madera para entender cuál es la tipología de residuos que generan.

En Uruguay se emplea preferentemente el Sistema de Aprovechamiento denominado *Cut to Length* (CTL), desarrollado en los países europeos escandinavos. El otro gran Sistema de Aprovechamiento maderero es el denominado *Full-Tree* (FT) y es el preferentemente seguido en Norteamérica.

El motivo de que se utilice preferentemente el Sistema CTL en Uruguay es que se trata de un Sistema muy optimizado para el aprovechamiento de madera de calidad en terrenos llanos o con poca pendiente, donde es posible la circulación de la maquinaria con facilidad. Otra razón importante es que este Sistema provoca impactos moderados sobre el suelo.

Repasemos las más importantes características de ambos Sistemas desde el punto de vista de los residuos forestales que generan a continuación.

2.3.1 *El Sistema de Aprovechamiento Cut to Length (CTL)*

Se caracteriza porque el procesado de la madera se realiza en el interior del monte. Los árboles son talados, desramados y tronzados *in situ* y la madera queda apilada formando filas para ser desemboscada posteriormente hasta cargadero.

El equipo de trabajo está formado generalmente por las siguientes máquinas que trabajan de manera secuencial en el proceso:

- ✦ *Corta y procesado con harvester.* Es la máquina que recorre la plantación, encargada de procesar los árboles desde su posición en pie hasta formar las pilas de madera cortadas a la longitud determinada. En el Uruguay generalmente se procesa la madera de eucalipto con destino celulosa con largos entre 2,40 m y 7,20 m; y entre 2,40 y 3,50 m para la madera sólida de pino y eucalipto).

Los *harvesters* alcanzan su máximo rendimiento en pendientes suaves o moderadas, cuando son capaces de moverse con agilidad y eficacia por el monte. También son equipos óptimos cuando las existencias maderables son elevadas y la plantación es regular, pues se maximiza su rendimiento horario. Son equipos caros que condicionan el diseño de la cadena logística CTL y su economía. La madera puede ser descortezada o no en función de las necesidades para su transformación. En Uruguay generalmente se maneja madera sin corteza en las cortas de eucaliptares para celulosa, y madera con corteza en pinares y eucaliptares para madera sólida. En el primer caso se debe a que se optimiza el transporte al favorecerse adicionalmente su secado natural, un coste muy importante en la cadena de valor de la madera para celulosa. En el segundo caso la madera tiene un alto valor unitario, y se transporta verde y con corteza para que mantenga toda su calidad hasta que se procese en los aserraderos.

- ✦ *Desembosque de madera con forwarder.* Son tractores forestales especializados en desemboscar la madera desde el interior del monte hasta los cargaderos accesibles a los camiones para su transporte hasta los centros de transformación. Son tractores en los que la madera va alojada en una caja trasera. Se trata de maquinaria diseñada para transmitir el menor esfuerzo posible al suelo y evitar su compactación u otro tipo de daños al mismo.

Este Sistema está optimizado cuando el principal recurso que se extrae de los montes es la madera, ya que logísticamente no moviliza ni transporta residuos innecesariamente, que quedan como restos forestales dispersos en el monte.

El método operativo tradicional consiste en equipos de trabajo conformados por dos *harvesters* por *forwarder*. Los *harvesters* procesan los árboles y van apilando la madera en filas

laterales mientras disponen las copas y ramas delante de la senda de la máquina por la que transita. De este modo la máquina no circula directamente sobre el suelo mineral, lo que repercute en una menor probabilidad de dañar al suelo por la formación de rodadas o por compactación, especialmente en condiciones de suelo húmedo tras una lluvia. Este efecto de circular sobre la cama de residuos es especialmente importante considerando el desembosque de la madera por los *forwarders*. Estas máquinas realizan varias veces el mismo recorrido (más movimientos) sobre la misma senda de desembosque hasta que completan la saca de la madera, por lo que el efecto protector de los residuos así dispuestos es notable.

Por el contrario, una vez que la maquinaria ha pasado sobre los residuos estos quedan contaminados con tierra y piedras, lo que resulta en un problema para valorizarlos después como combustible. Especialmente en tiempo húmedo, donde quedan muy contaminados por barro.

Otro efecto beneficioso del Sistema CTL al dejar los residuos dispersos es el de asegurar que gran parte de los nutrientes contenidos en la fracción aérea de los bosques permanece en el monte y pueden quedar disponibles para la nueva plantación, ya que la madera extraída (especialmente en el caso de que se aproveche sin corteza) contiene una pequeña proporción de los nutrientes totales de la plantación.

2.3.2 El Sistema de Aprovechamiento Full-Tree (FT)

Se caracteriza porque el procesado de la madera se realiza en el exterior del monte. Los árboles son talados manual o mecánicamente, y el árbol completo es desemboscado a un cargadero donde se procesa y se preparan las pilas de madera para ser transferidas a los camiones para su transporte a su destino final.

El equipo de trabajo está formado generalmente por los siguientes subprocesos:

- .. *Corta manual con motosierra o con feller*. El *feller* es una máquina especializada en el apeo y disposición de los árboles sobre el terreno para que puedan después ser desemboscados por el *skidder*.
- .. *Desembosque con skidder*. Son tractores forestales de arrastre y los árboles viajan suspendidos, o más habitualmente semisuspendidos, por lo que van en contacto con el suelo y eventualmente pueden provocar daños severos en el mismo, especialmente en condiciones de suelo húmedo. La capacidad de carga del ciclo de trabajo de los *skidders* es inferior a la de los *forwarders*. En consecuencia a igualdad de toneladas extraídas más tránsito es necesario con este Sistema respecto al CTL, y mayores son las probabilidades de daños con respecto a éste.
- .. *Procesado de madera en cargadero*. Los cargaderos son espacios habilitados de gran tamaño donde se procesa la madera (desramado, descortezado en su caso y tronzado), y se acopia hasta que son cargados por los camiones madereros hasta los centros de transformación. También es la zona de acumulación de los residuos. Cuando existe la posibilidad de un aprovechamiento de los mismos, este Sistema compite muy bien en costes con el Sistema CTL, porque integra simultáneamente en el aprovechamiento forestal la extracción de toda la biomasa y la madera del bosque.

Este sistema moviliza una gran cantidad de material, y es el más indicado cuando la escabrosidad de los montes impide que se pueda trabajar en el interior de los mismos con eficacia, o cuando la plantación es tan irregular en existencias maderables y tamaños de los pies que no puede aplicarse un Sistema CTL eficientemente. También cuando existe la posibilidad de valorizar energéticamente los residuos forestales.

El principal problema del Sistema FT reside precisamente en su potencial efecto pernicioso sobre los suelos. Por un lado impactan mecánicamente sobre el suelo, pudiendo ser promotores de la activación de procesos de erosión. En segundo lugar, es casi total la extracción de biomasa, lo que en los cultivos forestales intensivos puede repercutir en una pérdida de la fertilidad de los suelos y de su capacidad productiva si no se adoptan medidas compensatorias y mitigatorias.

2.3.3 **Ventajas y desventajas comparativas del Sistema CTL vs. el Sistema FT**

Repasemos las ventajas más importantes del CTL para poder ponderar adecuadamente la conveniencia del empleo de uno u otro Sistema en cada circunstancia:

1. En el Sistema CTL la madera se maneja con mayor cuidado y es más improbable que se dañe durante la saca o se ensucie con tierra.
2. Es un Sistema menos agresivo y que provoca menores daños en el arbolado que permanece en pie en los raleos. Este hecho es especialmente importante en los cultivos forestales para la producción de madera sólida, donde la masa residual en pie acumula todo el valor de las inversiones forestales que se han realizado.
3. Es un Sistema más fiable operativamente porque requiere un menor número de tipos de máquinas diferentes y de procesos encadenados. Esto repercute favorablemente en la eficiencia del Sistema, ya que por ejemplo no es tan sensible durante la época de lluvias a paradas de operación por los riesgos de daños al suelo. En el caso del Sistema FT, incluso una pequeña lluvia puede detener todo el Sistema de Aprovechamiento al no poder operar los *skidders* durante periodos de tiempo prolongados por potenciales riesgos de daños a los suelos. Sin embargo en el Sistema CTL, puede estar impedido el desembosque con el *forwarder* por este motivo, pero los *harvesters* pueden continuar con su tarea.
4. No necesitan la apertura de grandes espacios como cargaderos. Los cargaderos en los Sistemas FT típicamente pueden tener varias hectáreas.
5. Induce una menor alteración del suelo al evitar arrastres de árboles.
6. Favorece la permanencia de la materia orgánica y de la mayor parte de los nutrientes en el monte.

Como principales desventajas podemos citar las siguientes:

1. Mayores necesidades de inversión en capital humano y en equipamientos.

2. Mayores necesidades de mantenimiento y mayor incidencia de averías en las máquinas CTL, especialmente en los *harvesters*, que son máquinas sofisticadas y menos robustas que los *fellers* y los *skidders*.
3. No está diseñado originalmente para integrarse con la bioenergía, aunque veremos que se puede combinar con otros procesos para conseguirlo (enfardado de residuos). Aún así, su rendimiento extrayendo biomasa por hectárea no alcanza al mostrado por el Sistema FT.

3 Sistemas de Aprovechamiento Integrales de madera-biomasa

La bioenergía debe integrarse con los sistemas de manejo tradicionales para optimizar el conjunto de los bienes y servicios que es posible obtener de los bosques. Desde la consideración de que la gestión forestal es una actividad extensiva, la sinergia que se impulsa con este enfoque permite mejorar la cantidad y la calidad de los productos forestales, y contribuye por lo tanto a la rentabilidad y sostenibilidad de la actividad forestal. Es muy importante no olvidar que la biomasa forestal residual es un subproducto de bajo valor añadido, y que para hacerla competitiva y reducir al máximo los costes de su aprovechamiento, éstos se deben diluir con los costes de las demás operaciones forestales; raleos y cortas finales.

Lo que no resulta tan obvio es el hecho de que cuando se intentan desarrollar Sistemas Integrados madera-bioenergía se puede incurrir en ineficiencias en determinados subprocesos, aunque la eficiencia resultante del nuevo proceso completo sea superior a la eficiencia de cada uno de sus subprocesos por separado. Estas ineficiencias generan costes ocultos, que en muchas ocasiones son poco evidentes a primera vista, pero que deben ser identificados para poder ser minimizados.

Un claro ejemplo es el hecho de extraer un gran porcentaje de biomasa en suelos poco fértiles, en los que con ella se retira gran parte de los minerales que de otro modo estarían disponibles para la nueva plantación. Es preciso corregir este efecto mediante prácticas de refertilización, y el coste de esta refertilización debe ser imputado al nuevo uso de la bioenergía. Vemos que este coste puede no ser detectado con facilidad en primera instancia, por eso se le denomina como un coste oculto.

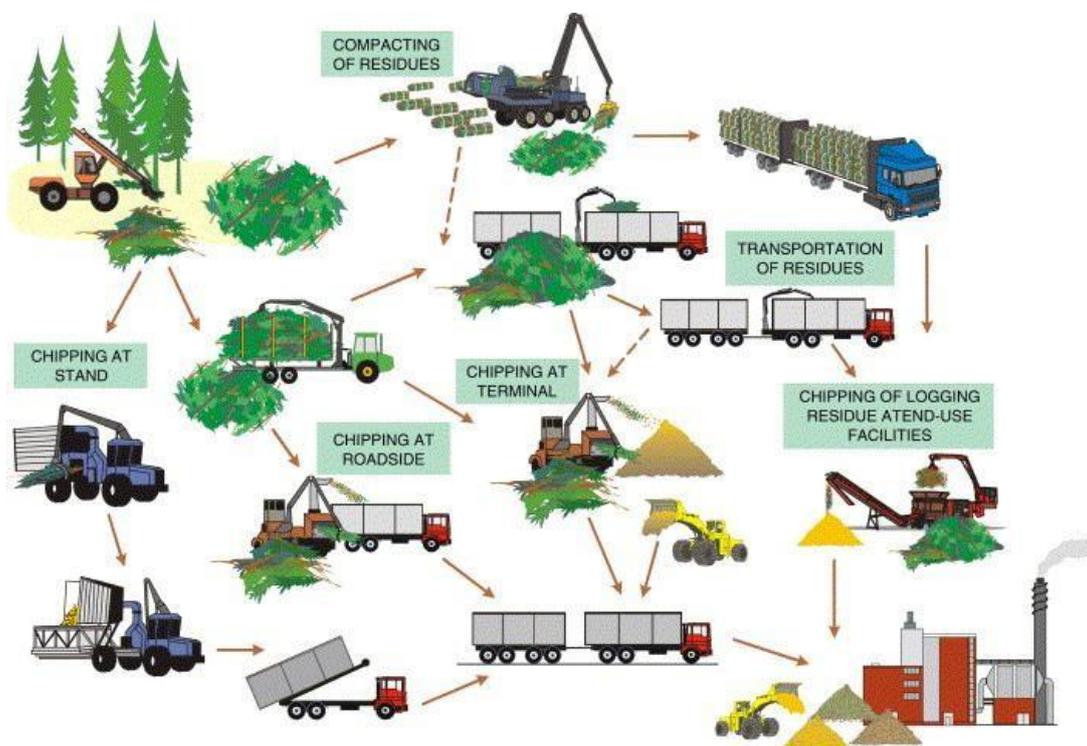


Figura nº 1: Cadena de suministro de residuos forestales para usos energéticos. Fuente: Alakangas, 2006.

Los principales condicionantes respecto a la selección de un Sistema de Aprovechamiento de la biomasa son:

- .. Las existencias de biomasa (t/ha).
- .. Las distancias de transporte implicadas.
- .. Los requerimientos del consumidor final.
- .. Las opciones técnicas para conseguir el acordonado o agrupación de la biomasa en el monte.
- .. El aseguramiento de la calidad de la biomasa.
- .. Las posibilidades de inversión en la logística de procesamiento, almacenamiento y transporte.

Se puede afirmar generalmente que las limitaciones de operación en costes de los Sistemas permiten la bioenergía hasta unas distancias de transporte de 100 Km desde el origen de la biomasa al centro de consumo.

Es importante destacar que las grandes plantas de energía actúan como promotoras de inversiones en la cadena de valor de la biomasa forestal, y permiten el desarrollo efectivo de las iniciativas empresariales que las ponen en marcha.

3.1 *Propuesta de Sistemas de Aprovechamiento de la biomasa residual (Mejores Prácticas Disponibles) aplicables en el Uruguay*

En el contexto internacional actual el aprovechamiento de la biomasa forestal residual se concibe como un *PROCEDIMIENTO INTEGRAL*, que persigue la máxima eficiencia en el aprovechamiento simultáneo, tanto de la madera, como del resto de las fracciones de los árboles con potencial energético.

Como característica común de todos los Sistemas se encuentra siempre mejores rendimientos cuanto mayores son las existencias de residuos por hectárea, pero más crítico resulta aún que los residuos de encuentren lo más agrupados y concentrados posible tras las operaciones de madereo que les han dado origen. En este caso los diferentes equipos alcanzan con mayor facilidad su régimen normal de operación, y se logran los rendimientos nominales objetivos.

Para ello resulta crítico en los Sistemas CTL que se modifique el método de trabajo actual en el Uruguay de tal modo que se acordonen y concentren los residuos lo máximo posible en campo. Esto es una generalidad para todos los Modelos que revisaremos. Nótese que este cambio en los procesos implica un coste oculto del tipo de los mencionados anteriormente del que debemos ser conscientes en todo momento.

Otro principio que se cumple como axioma es el hecho de que siempre se obtienen mejores rendimientos cuando la madera se corta mecánicamente que manualmente. El procesado mecánico de la madera redundará en una mayor concentración de los residuos, por lo que se facilita enormemente su aprovechamiento.



Figura nº 2: Integración de la bioenergía y la producción de madera. Fuente: *Forest Energy Portal*.

Como principales Modelos para la bioenergía con biomasa forestal residual en el Uruguay se identifican los siguientes:

3.1.1 Modelos compatibles con el Sistema CTL en cortas finales

3.1.1.1 Modelo nº 1. Enfardado y astillado en planta

Denominación: CTL-TR-Enfardado.

Aplicado en cortas finales (TR: tala rasa). El modelo precisa al menos 20 t/ha de residuos para que la enfardadora, que es el equipo principal en este Sistema, opere con buen rendimiento. Los residuos deben ser acordonados previamente de forma conveniente por el *harvester* o por los motoserrietas (en caso de cortas manuales) para que la grapa de la enfardadora permita la alimentación continua del dispositivo compactador.

La grapa de la enfardadora no puede recoger el 100% de los residuos acordonados. Se considera que el porcentaje de recogida de los residuos se mantiene aproximadamente en el 80%.

Los fardos son un formato de transporte y almacenamiento de los residuos adecuado para largas distancias, y pierden competitividad frente a los Sistemas de Astillado en monte para medias y pequeñas distancias de transporte. Permite aprovechar los menores costes de escala que ofrecen las astilladoras fijas en planta y más importante aún, gestionar la humedad de la biomasa que se suministra con facilidad, ya que consiente el secado natural (oreado), y la mejora sustancial del PCI de los combustibles frente a la logística de astillas.

Este Modelo presenta otra gran ventaja como es la de estar integrado con la cadena logística de la madera: esquema *Forwarder*+Camión maderero, así como conseguir una buena estiba de la biomasa en los camiones, lo que hace el transporte competitivo.

No obstante presenta también inconvenientes, como es por ejemplo el alto coste operativo del equipo y su bajo rendimiento extrayendo biomasa, que suele ser inferior a las 10-12 t/h de biomasa empacada, y entre 20-25 fardos/h, especialmente cuando trabaja en pendiente. Puede presentar también dificultades en el empacado de restos poco disgregados, como árboles completos y copas grandes.

Maquinaria

Enfardadora forestal-*forwarder*-Camión maderero-Astilladora fija en planta

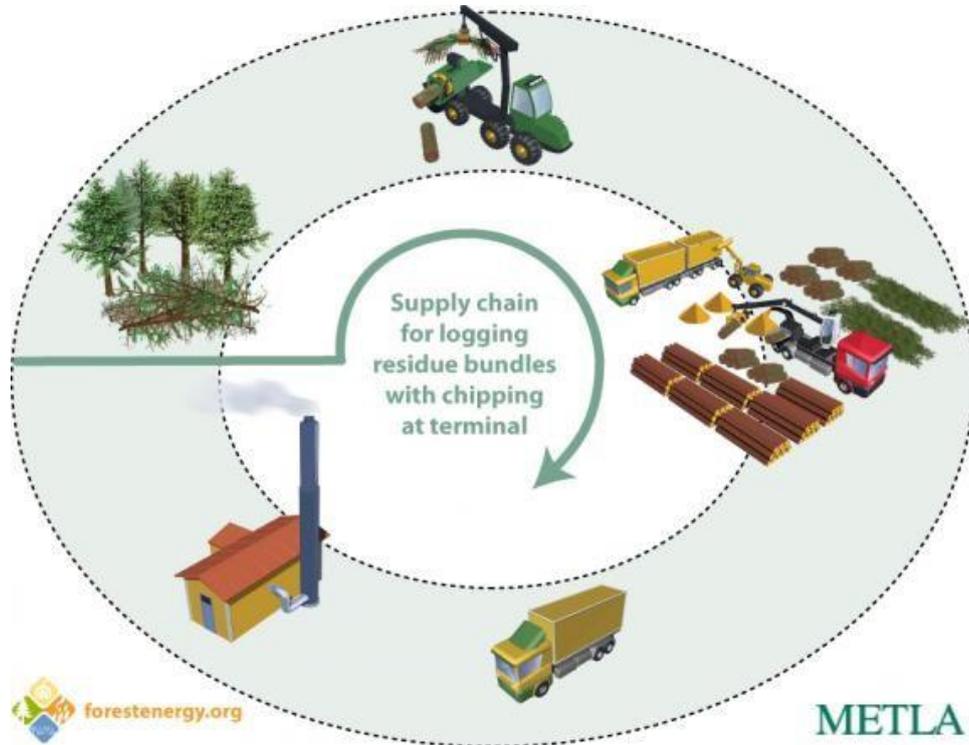


Figura nº 3: Modelo nº 1: Enfardado y astillado en planta. Fuente: Forest Energy Portal.

3.1.1.2 Modelo nº 2. Desembosque de restos brutos y astillado en cargadero

Denominación: CTL-TR-Astillado en cargadero.

Comprende el desembosque de la biomasa bruta a cargadero y su astillado *in situ*. Es por tanto un modelo que recurre a la logística de astillas.

Resulta adecuado cuando las distancias desde el monte a la planta son medias o cortas, o es preciso suministrar directamente astillas por diferentes motivos (por ejemplo porque la planta no dispone de astilladora para procesar el tipo de biomasa de referencia). En ambos casos no se justifica una logística de fardos como la del Modelo nº 1.

El desembosque de los restos brutos es la debilidad de este Modelo, ya que estiban mal en los equipos de transporte dado su muy bajo peso específico (baja densidad energética por consiguiente). No obstante se pueden obtener resultados interesantes cuando se emplean *forwarders compactadores*, los cuales pueden mejorar en un 40% el rendimiento en el desembosque de esta biomasa respecto a los *forwarders* con remolque ordinario. Adicionalmente la grapa del *forwarder* es capaz de recolectar con eficacia únicamente el 80% de los residuos acordonados.

Presenta ventajas importantes como es la de suministrar materia prima en planta ya lista para su consumo directo, o que con los camiones adecuados el transporte de astilla agota la carga útil, y es posible evitar falsos fletes a pesar de manejar un granel de bajo peso específico (especialmente importante en los casos en los que sea posible manejar astilla seca u oreada).

Por el contrario la logística de astillas es una logística de graneles muy distinta a la tradicional logística maderera, por lo que no se logran sinergias con los aprovechamientos madereros tradicionales a este respecto. Este aspecto sustancial ha de ser siempre tenido en cuenta.

Adicionalmente, la principal limitación de este Modelo sucede cuando no es posible astillar biomasa oreada durante un tiempo y debe procesarse poco después de la corta. En este caso la biomasa no ha tenido tiempo de perder humedad, y una vez astillada resulta muy difícil que pierda agua en el corto plazo. Son frecuentes los problemas de degradación e incluso episodios de auto combustión si se almacena en pilas durante periodos prolongados, lo que repercute en una importante pérdida de su calidad y en riesgos de incendios.

En el caso de que se consuma en verde, estaremos aportando a la caldera una biomasa de bajo PCI relativo y baja calidad, especialmente comparada con el mismo tipo de biomasa oreada. Esta propiedad de la logística de las astillas nunca ha de descuidarse en aplicaciones energéticas.

Maquinaria

Forwarder compactador-Astilladora en cargadero-(Pala cargadora)-Camión con caja o piso móvil

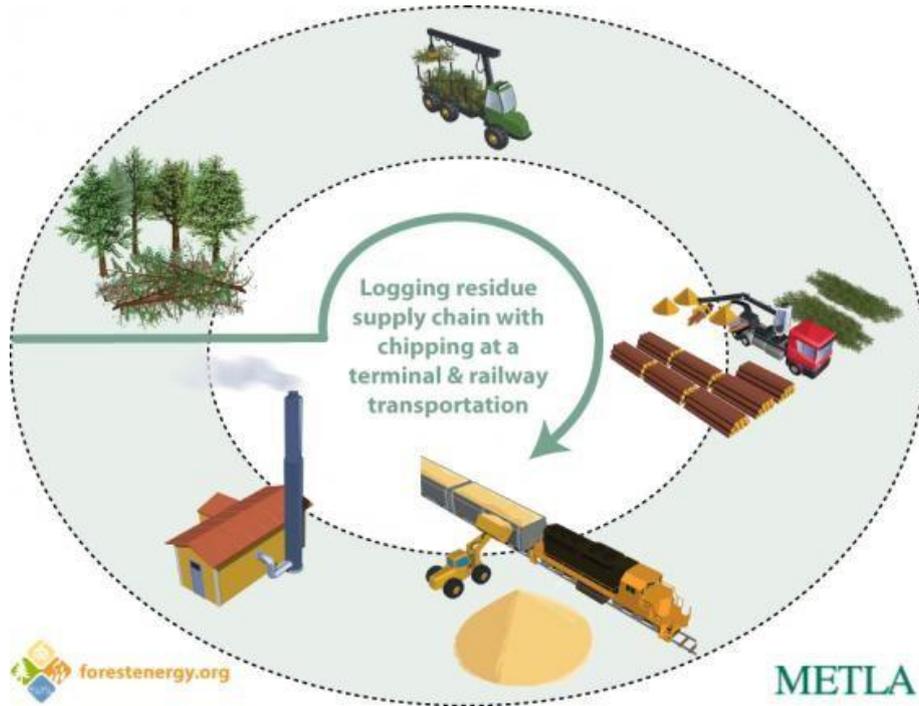


Figura nº 4: Modelo nº 2: Desembosque de restos brutos y astillado en cargadero. Fuente: *Forest Energy Portal*.

3.1.1.3 Modelo nº 3. Desembosque y transporte de restos brutos a planta

Denominación: CTL-TR-Transporte de restos.

A diferencia del Modelo anterior se difiere el astillado a la planta por economía. Su fortaleza está en su sencillez, sin embargo el transporte de restos brutos es muy ineficiente y solamente resulta competitivo con pequeñas distancias de transporte, como mucho entre 15-20 Km.

Se suele emplear para lotes pequeños de biomasa cercanas a las plantas, donde no se justifica la puesta en operación de una logística más compleja que requiera más medios.

Permite un buen secado natural y mejora ostensiblemente sus rendimientos cuando se emplea un *forwarder compactador* para el desembosque en vez de uno convencional, pero el empleo de éste último no es habitual cuando se trata de pequeños volúmenes de biomasa a desemboscar.

Maquinaria

Forwarder compactador-Camión maderero-Astilladora fija en planta

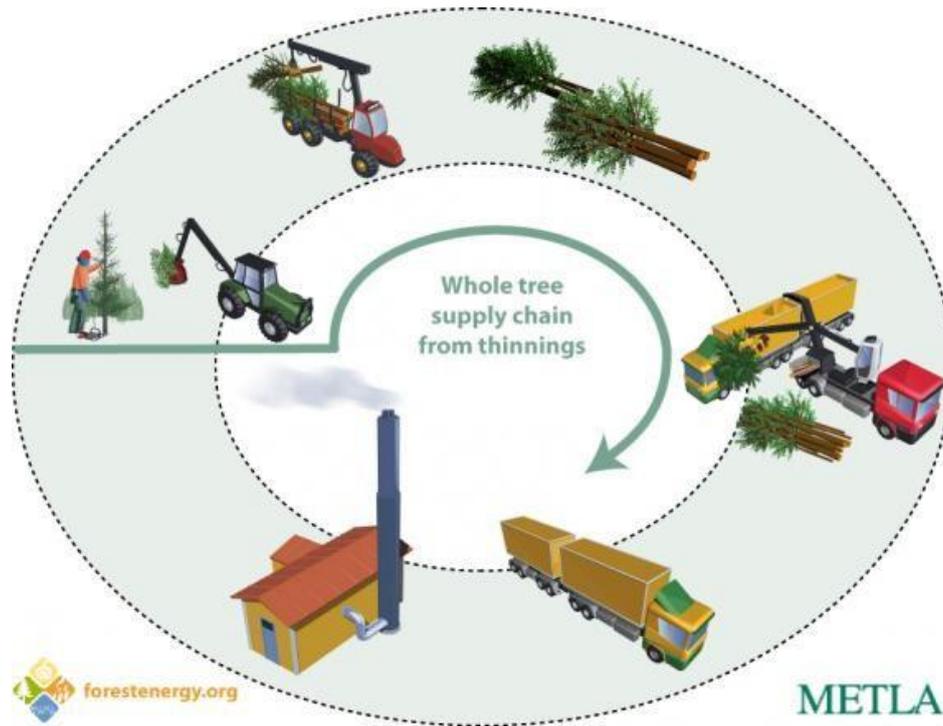


Figura nº 5: Modelo nº 3: Desembosque y transporte de restos brutos a planta. Fuente: Adaptado de *Forest Energy Portal*.

3.1.1.4 Modelo nº 4. Astillado móvil

Denominación: CTL-TR-Astillado móvil.

Es un tipo de logística de astillas en la que se prescinde del desembosque de la biomasa acordonada, por el contrario, el astillado se realiza en el interior del monte por una astilladora montada sobre un *forwarder*. La astilladora recorre los cordones de restos previamente apilados y almacena las astillas habitualmente en un depósito dispuesto en el propio *forwarder*. La máquina puede estar apoyada por otro vehículo para el desembosque de la astilla una vez está lleno el depósito, o ella misma circula hasta un cargadero donde deja la astilla apilada.

Presenta similares ventajas e inconvenientes que las comentadas para el Modelo nº 2, a las que se les pueden añadir las siguientes:

1. La operación más complicada del proceso, como es el astillado de la biomasa, se realiza dentro del propio monte, lo que redundará en pérdidas de rendimiento de la máquina ante las frecuentes adversidades que acontecen cuando cualquier equipo circula fuera de las pistas y caminos.
2. El hecho de estar apoyada por vehículos satélites, o en el caso contrario, de disponer la astilla distribuida en pequeños y medianos acopios en el monte, dificulta la carga de los camiones de transporte de la astilla hacia fuera del mismo. Para evitar estos inconvenientes la descarga de la astilla se suele hacer sobre contenedores que serán manejados por camiones "*multilift*", lo que demanda una logística más especializada lo que no es siempre es fácil de configurar.

3. Su rendimiento es muy sensible a que la biomasa haya sido muy bien acordonada previamente. En caso contrario sus costes de operación se elevan exponencialmente.
4. Tampoco consigue recolectar más de un 80% de la biomasa acordonada.

De hecho este Modelo es poco utilizado dado que no suele competir en precio con el resto de los sistemas.

Maquinaria

Astilladora móvil sobre *forwarder*-(Pala cargadora)-Camión con caja o piso móvil o camiones "multilift".

3.1.1.5 Modelo nº 5. Aprovechamiento de madera con corteza

Denominación: CTL-TR-Corteza.

Consiste en evitar el descortezado de la madera en el Sistema CTL en los eucaliptares y transportar la madera con corteza como la manera más eficiente de manipuleo de este combustible desde el monte a planta. Este Modelo prescinde de aprovechar la biomasa de menor calidad y más cara de recolectar en un Sistema CTL: las copas. Considerando su baja calidad y su escasas existencias en los eucaliptares puede ser una renuncia asumible. Sobre todo considerando que la recogida de esta fracción es especialmente cara.

En otras partes del mundo es habitual desde hace decenios que la industria de la celulosa trabaje con madera con corteza y ésta se emplee en las propias plantas como combustible.

Actualmente en el Uruguay, la madera de eucalipto para celulosa se descortezada para optimizar enormemente los costes de transporte. Por un lado se acelera el secado natural de la madera y se evita el transporte de residuos a las plantas (la corteza). Considerando que el porcentaje en peso de la corteza con respecto a la madera es de un 13-14%, y que las distancias medias desde las plantaciones a las plantas de celulosa son como promedio unos 200 Km en el país, entendemos la importancia del descortezado de la madera en campo para no incurrir en importantes costes de transporte.

Cuando consideramos ahora el aprovechamiento de la bioenergía en los eucaliptares la situación cambia radicalmente y el aprovechamiento de la corteza adquiere gran interés. Y aún más al constatar que gran parte de la biomasa residual que se genera en los eucaliptares con destino celulósico es corteza: aproximadamente tres cuartas partes del total generado en peso. Por lo tanto, la implantación del aprovechamiento de la corteza puede ser muy fácil de implementar, y no exige apenas cambios en los equipamientos CTL que se aplican en estos momentos en la fase forestal, pero sí la inversión en una equipo de descortezado fijo en la recepción de la madera en planta. Otras ventajas identificadas son:

1. Se posee la opción de renunciar a recolectar la biomasa residual de copas y ramas, por lo que los *harvesters*, no tienen que acopiarla en cordones y pueden seguir disponiéndola de cama por la que circula esta máquina y los *forwarders*.

2. El descortezado es una operación que requiere tiempo, entre el 35-40% del tiempo de procesado de los árboles, por lo que no realizarlo repercute en una importante mejora de costes en la cosecha de la madera.

No obstante, no todo son ventajas:

1. El transporte de la madera con corteza implica un sobre coste que es preciso evaluar. Principalmente como consecuencia de que se transporta la madera verde. Esto hará que solamente sea posible aplicar este Modelo a determinadas distancias donde este sobrecoste pueda ser asumido por la corteza como combustible. Superada esta distancia se seguirá descortezando en el CTL porque no será competitivo el aprovechamiento de la corteza para bioenergía desde estos orígenes.
2. No se puede emplear el secado natural de la madera con corteza en campo ya que esta requiere mayores periodos de oreo lo que la hace susceptible a los ataques de plagas como la *Phoracanta* sp., que no solo merman la calidad de la madera, si no que puede llegar a constituir un serio riesgo sanitario para las plantaciones colindantes.

La principal ventaja de este Modelo es su plena integración con el CTL y seguir aprovechamiento sus principales ventajas, entre ellas sus menores impactos ambientales con respecto al FT. No obstante carece de interés en las plantaciones de pino y eucalipto para madera sólida, en las que la madera se aprovecha y se transporta con corteza. Al no tratarse de madera de trituración ha de mantenerse verde (para evitar que se agriete y se deforme) y protegida de daños (golpes, contaminaciones, etc.) para poder ser aserrada y obtener piezas de la mayor calidad. En estas plantas ya es habitual el aprovechamiento de la corteza como combustible para usos térmicos y eléctricos.

Maquinaria

Descortezadora de troncos en planta-Astilladora fija en planta

3.1.2 Modelos compatibles con el Sistema FT en cortas finales

3.1.2.1 Modelo nº 6. FT y astillado en cargadero

Denominación: FT-TR-Astillado en cargadero.

El Modelo comienza donde acaba el modelo de aprovechamiento FT clásico. Sabemos que a diferencia del CTL, este Sistema extrae todos los árboles completos hasta el cargadero donde se procesa la madera y se acopian aparte los residuos listos para ser astillados y transportados a planta.

Nótese que de nuevo nos encontramos frente a una logística de astillas con las ventajas e inconvenientes ya comentados.

Las características diferenciales de este modelo provienen de las propias características intrínsecas del modelo FT. Las más relevantes estriban en que se consigue un muy alto porcentaje de aprovechamiento de toda la biomasa residual del campo, frente a la que se

obtiene de la recogida posterior de residuos después de aplicar un sistema CTL, en el cual es frecuente que no se pueda recoger más del 80% de la biomasa acordonada.

Este sistema es también competitivo en costes; al estar ligada la extracción de residuos a la de la madera se consiguen las mejores sinergias. No obstante, las principales limitaciones e inconvenientes provienen de las propias y conocidas para sistema FT. Existen limitaciones ambientales como son el mayor impacto sobre el suelo, como consecuencia del arrastre de árboles por los skidder, especialmente con el suelo mojado tras un periodo de lluvias, y una mayor extracción de los nutrientes del suelo. Y operativas, ya que se trata de un proceso con un importante cuello de botella residente en que el monte debe presentar buenas condiciones para que transite el *skidder* sin provocar daños en los suelos, de nuevo especialmente en condiciones húmedas, lo que puede provocar la detención de toda la cadena logística (*hot chain*).

Presenta otros inconvenientes que no son menores, como es la necesidad de grandes cargaderos donde acopiar los árboles extraídos, procesarlos y acopiar diferencialmente la madera del resto de la biomasa.

Maquinaria

Feller buncher-Skidder-Astilladora en cargadero-(Pala cargadora)-Camión con caja o piso móvil

3.1.3 Modelos compatibles con el Sistema CTL en raleos comerciales

3.1.3.1 Modelo nº 7. Desembosque de restos brutos y astillado en cargadero

Denominación: CTL-RC-Astillado en cargadero.

Este modelo precisa que las copas queden acordonadas en la medida de lo posible, y es más eficaz en raleos sistemáticos que en los selectivos, donde conseguir la concentración de los residuos es más dificultoso.

Para mejorar el acordonado de los residuos se puede realizar la tala de los pies por un *feller buncher* que los acordone para que sean procesados por el *harvester*. En este caso se complica la logística del Modelo pero se pueden alcanzar mejores rendimientos, especialmente en los raleos selectivos, donde al *harvester* le resulta más difícil el acordonado de las copas.

El desembosque de las copas completas se realiza con un *forwarder* o *forwarder compactador*, que mejora sensiblemente su rendimiento cuando se le dota de una grapa con un espadín de corta. De este modo se dimensiona mejor el tamaño de las copas a la caja de la máquina.

Persisten los riesgos de daños en los árboles en pie tras el raleo, por lo que ha de valorarse adecuadamente el tamaño y características del *forwarder* que se utilizará para minimizarlos.

Este modelo genera también una logística de astillas con las ventajas e inconvenientes ya apuntados previamente.

Maquinaria

Forwarder (compactador)-Astilladora en cargadero-(Pala cargadora)-Camión con caja o piso

móvil



Figura nº 6: Modelo nº 7: Desembosque de restos brutos y astillado en cargadero. Fuente: *Forest Energy Portal*.

3.1.3.2 Modelo nº 8. Desembosque y transporte de restos brutos a planta

Denominación: CTL-RC-Transporte de restos.

Similar al anterior pero se difiere el astillado a la planta por economía. Solamente resulta competitivo con pequeñas distancias de transporte, como mucho entre 15-20 Km.

Se suele emplear para lotes pequeños de biomasa, más típico en raleos que en las cortas finales, cercanas a las plantas donde no se justifica la puesta en operación de una logística más compleja que requiera más medios.

Maquinaria

Forwarder compactador-Camión maderero-Astilladora fija en planta



Figura nº 7: Modelo nº 8: Desembosque y transporte de restos brutos a planta. Fuente: *Forest Energy Portal*.

3.1.4 Modelos compatibles con el Sistema FT en raleos

3.1.4.1 Modelo nº 9. Raleos no comerciales FT

Denominación: FT-RN-Astillado en cargadero.

La peculiaridad de este sistema estriba en que opera sobre maderas de pequeño diámetro que no tienen aplicaciones comerciales. Este tipo de raleo puede generar cantidades interesantes de biomasa en ciertas ocasiones, pero concentrada en muchos árboles de pequeño a mediano tamaño. En otras muchas las bajas existencias por hectárea dificultan que se pueda aprovechar con competitividad frente a otras fuentes de suministro de biomasa y que no sea un aprovechamiento viable.

Como consecuencia de los pequeños tamaños de los árboles, y para lograr un aprovechamiento lo más económico posible, se emplean cabezales multitaladores (*feller buncher*). Estos cabezales permiten formar mazos de árboles tras acopiarlos en sucesivos cortes antes de dejarlos apilados en el suelo. Lo habitual es que después sean desemboscados por un *skidder* con grapa, o en caso de riesgos para el suelo debido a los arrastres inducidos, incluso por un *forwarder*, aunque en este caso el incremento de los costes de esta operación resulta significativo.

Se astilla en cargadero, por lo que de nuevo estamos ante una logística de astillas con sus peculiaridades comentadas.

Como Modelo FT presenta la necesidad de espacios amplios en los cargaderos para el aprovechamiento integral de la madera y de la biomasa, y a cambio alcanza el máximo porcentaje de aprovechamiento de la biomasa existente en el campo.

Maquinaria

Feller buncher-Skidder (Forwarder)-Astilladora en cargadero-(Pala cargadora)-Camión con caja o piso móvil.

3.1.4.2 Modelo nº 10. Raleos comerciales FT y astillado en cargadero

Denominación: FT-RC-Astillado en cargadero.

Conceptualmente este modelo es similar al anterior pero presenta la importante diferencia de aplicarse en montes con mucho mayor tamaño de árboles y con mayor carga de residuos por hectárea.

En este caso, el tamaño de los árboles limita la movilidad del *skidder* (y del *forwarder* si se decide su uso) durante el desembosque, y puede llegar a hacerlo inviable por el nivel de daños que puede provocar en los árboles en pie, verdadero objetivo de estas intervenciones silvícolas. Ésta es su principal limitación.

Una mejora importante la supone el empleo de un *skidder* tipo *clumbunk*, en el cual la grúa del mismo permite un mejor acceso a los árboles y puede minimizar el riesgo de daños por impactos en los árboles remanentes al mejorar la maniobrabilidad del equipo en el interior de la plantación.

Es importante destacar que de nuevo genera una logística de astillas, y que el resto de sus características derivan de ser un modelo acoplado a un sistema tipo FT.

Maquinaria

Feller buncher-Skidder (Forwarder)-Astilladora en cargadero-(Pala cargadora)-Camión con caja o piso móvil.

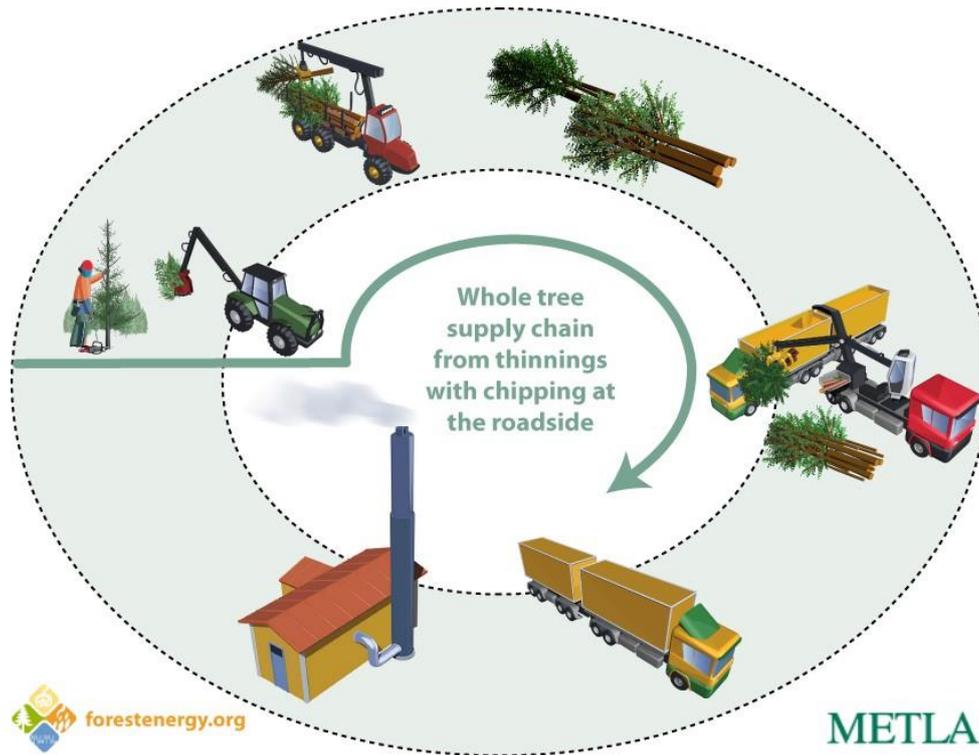


Figura nº 8: Modelo nº 10: Raleos comerciales FT y astillado en cargadero. Fuente: *Forest Energy Portal*.

3.1.4.3 Modelo nº 11. Raleos comerciales FT y astillado en planta

Denominación: FT-RC-Transporte de restos.

Similar al anterior pero se difiere el astillado a la planta por economía. Solamente resulta competitivo con pequeñas distancias de transporte, como mucho entre 15-20 Km.

Maquinaria

Feller buncher-Skidder (Forwarder)- Camión maderero-Astilladora fija en planta

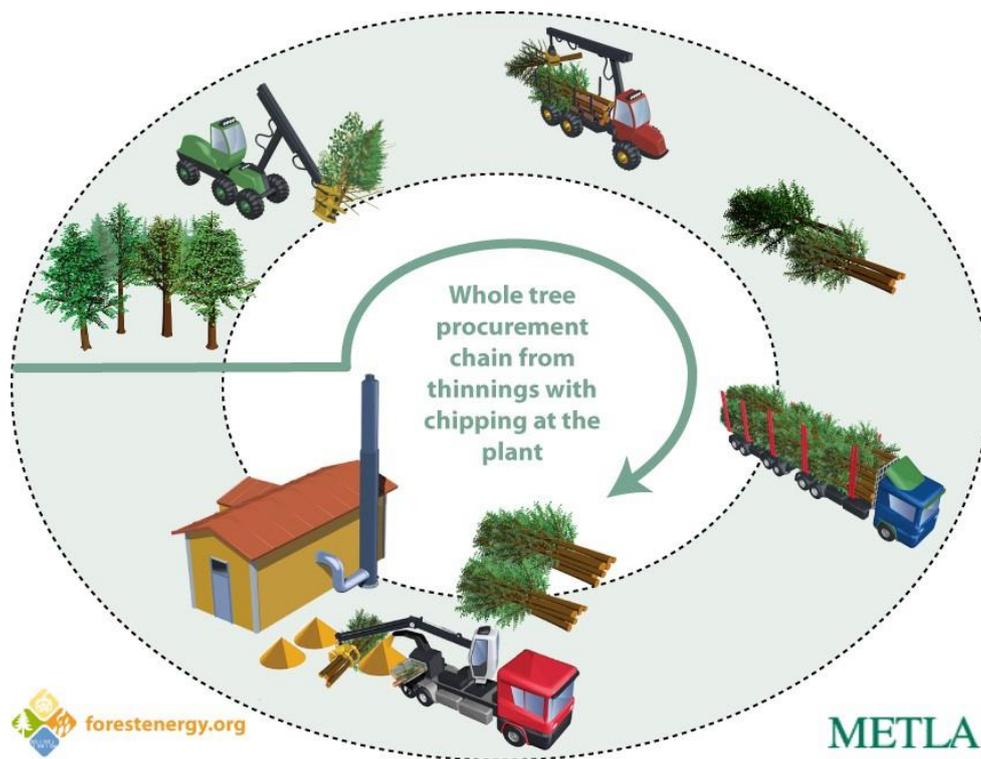


Figura nº 9: Modelo nº 11: Raleos comerciales FT y astillado en planta. Fuente: *Forest Energy Portal*.

3.1.5 Otros Sistemas en cortas finales

3.1.5.1 Modelo nº 12. Aprovechamiento de tocones

Denominación: TR-Tocones.

Consiste el destocoado de las plantaciones antes de su replantación. El equipamiento que se emplea es específico de este tipo de aprovechamiento, y se caracteriza por generar una logística de graneles distinta a la de las astillas. Esta logística necesita sus camiones de transporte propios.

Resulta también característico el empleo de implementos sobre retroexcavadoras, como son las cizallas, que fraccionan los tocones brutos para desprenderles parte de la tierra adherida y facilitar su estiba en los camiones evitando falsos fletes. Los camiones empleados son del tipo chatarrero, con cajas reforzadas y recrecidas que puedan resistir los impactos de los tocones durante su carga.

La operativa consiste en un destocoado con retroexcavadora, seguido de un desembosque de tocones con *forwarder* hasta el cargadero, o más frecuente, una reunión de los tocones realizada por un *bulldozer* con fleco en montones accesibles por las cizallas y los camiones. Sobre estos acopios trabajan las cizallas fragmentando los tocones, y acopiándolos de nuevo previa carga y transporte.

Una ventaja importante es que moviliza cantidades importantes de biomasa, maximizando el aprovechamiento de la biomasa residual de la plantación al final de su ciclo de cultivo.

El principal inconveniente de este modelo reside en el impacto directo que provoca como consecuencia de una gran remoción del suelo. Dependiendo de la naturaleza del suelo y de la pendiente, se pueden inducir activos procesos de erosión.

Maquinaria

Retroexcavadora-Bulldozer con fleco (Forwarder)-Cizalla sobre retroexcavadora-Pala cargadora-Camión chatarrero o similar-Pretrituradora y trituradora en planta



Foto nº 2: Acopio de tocones de *Eucalyptus globulus* sin procesar. Fuente: elaboración propia.

Tabla nº 2: Clave de Modelos para la Bioenergía con residuos forestales en el Uruguay.

Nº	Modelo	Abreviatura	Maquinaria/Proceso operativo	FAMILIA	
				CTL	FT
1	Enfardado y astillado en planta	CTL-TR-Enfardado	Enfardadora forestal-forwarder-Camión maderero-Astilladora fija en planta		
2	Desembosque de restos brutos y astillado en cargadero	CTL-TR-Astillado en cargadero	Forwarder compactador-Astilladora en cargadero-(Pala cargadora)-Camión con caja o piso móvil		
3	Desembosque y transporte de restos brutos a planta	CTL-TR-Transporte de restos	Forwarder compactador-Camión maderero-Astilladora fija en planta		
4	Astillado móvil	CTL-TR-Astillado móvil	Astilladora móvil sobre forwarder-(Pala cargadora)-Camión con caja o piso móvil o camiones "multilift".		
5	Aprovechamiento de madera con corteza	CTL-TR-Corteza	Descortezadora de troncos en planta-Astilladora fija en planta		
6	FT y astillado en cargadero	FT-TR-Astillado en cargadero	Feller buncher-Skidder-Astilladora en cargadero-(Pala cargadora)-Camión con caja o piso móvil		
7	Desembosque de restos brutos y astillado en cargadero	CTL-RC-Astillado en cargadero	Forwarder (compactador)-Astilladora en cargadero-(Pala cargadora)-Camión con caja o piso móvil		
8	Desembosque y transporte de restos brutos a planta	CTL-RC-Transporte de restos	Forwarder compactador-Camión maderero-Astilladora fija en planta		
9	Raleos no comerciales FT	FT-RN-Astillado en cargadero	Feller buncher-Skidder (Forwarder)-Astilladora en cargadero-(Pala cargadora)-Camión con caja o piso móvil		
10	Raleos comerciales FT y astillado en cargadero	FT-RC-Astillado en cargadero	Feller buncher-Skidder (Forwarder)-Astilladora en cargadero-(Pala cargadora)-Camión con caja o piso móvil		
11	Raleos comerciales FT y astillado en planta	FT-RC-Transporte de restos	Feller buncher-Skidder (Forwarder)- Camión maderero-Astilladora fija en planta		
12	Aprovechamiento de tocones	TR-Tocones	Retroexcavadora-Bulldozer con fleco (Forwarder)-Cizalla sobre retroexcavadora-Pala cargadora-Camión chatarrero o similar-Pretrituradora y trituradora en planta		

3.2 *Algunas claves para la adaptación de las tecnologías forestales actuales del Uruguay a la valorización energética de los residuos forestales*

Hemos visto como el sector forestal uruguayo se caracteriza por la amplia difusión del Sistema CTL, que es usado en la generalidad de los casos tanto en plantaciones de eucalipto para celulosa como en plantaciones de eucalipto y pino para madera sólida (con excepción del aprovechamiento de la madera sólida de grandes dimensiones en el que se utiliza el Sistema FT).

En consecuencia, la aplicación de los modelos de aprovechamiento de la biomasa fundados sobre el sistema CTL que hemos revisado, son los que presentan mayores facilidades para su implementación inmediata en Uruguay. Sin embargo, estos modelos no son los más idóneos para conseguir un aprovechamiento integral de la madera y de la biomasa. El Sistema CTL está diseñado para extraer la madera, y está optimizado en costes, procesos y equipamientos para este fin. En consecuencia, su adaptación para un aprovechamiento ahora integrado de madera-bioenergía difícilmente logrará las cotas de eficiencia, eficacia, y costes que los que se puedan alcanzar con los modelos sobre Sistemas FT. A pesar de esto, los Sistemas CTL presentan importantes ventajas respecto al menor riesgo de daños sobre el suelo, y sobre la masa residual en los raleos.

No existe en el país una amplia experiencia en la aplicación de Sistemas FT, y su adopción se observa con recelo a pesar del desarrollo incipiente de la bioenergía, que no es considerada como un aprovechamiento interesante frente al uso maderero tradicional. En consecuencia los operadores del mercado (propietarios de montes, empresas integradas en la Foresto-Industria y empresas de servicios forestales), no son incentivados todavía hacia un proceso activo de mejora de sus procesos actuales con vistas a lograr el citado aprovechamiento integral.

Adicionalmente se observa como las diferentes características sobre la cantidad y la calidad de la biomasa que se genera en los aprovechamientos madereros, como consecuencia de los diferentes tipos de manejo de las plantaciones, ejercen una importante influencia sobre los métodos más adecuados para ser implementados.

Los eucaliptares presentan menos carga de residuos forestales por hectárea que los pinares a la corta final, y gran parte de la biomasa consiste en la corteza que queda depositada en el suelo tras el CTL. Por lo tanto, el proceso lógico para aprovechar la biomasa de los eucaliptares en condiciones económicas pasa necesariamente por el aprovechamiento de la corteza, y en este caso, no tiene mucho sentido implementar modelos FT para extraer relativamente poca cantidad de biomasa adicional a la corteza. El hecho de extraer la madera sin descortezar permite el acceso a la mayor parte de la biomasa residual disponible, así como la integración del aprovechamiento de la biomasa con los métodos de trabajo actuales.

Complementariamente se presentan otros problemas que deben ser resueltos referidos a la necesidad del secado natural de la madera antes de proceder a su transporte, y al hecho de que dejarla apilada con corteza durante largo tiempo puede inducir la proliferación de plagas sobre las plantaciones limítrofes. Hemos visto también como en el caso de los

eucaliptares difícilmente se justifican esquemas FT habida cuenta de los inconvenientes que pueden acarrear en este tipo de cultivos forestales.

La situación es distinta en los pinares. La gran fracción de biomasa residual, y de alta calidad, que queda en el campo tras el aprovechamiento maderero permite considerar la aplicación de esquemas FT, especialmente en las cortas finales, pero también en los raleos puede ser una opción factible. En este caso será preciso ponderar adecuadamente las ventajas y las desventajas que ofrece el FT frente a factores adversos como la susceptibilidad de los suelos a erosionarse.

Habida cuenta de que en el Uruguay no están extendidos los equipamientos FT, tampoco son frecuentes otros equipamientos complementarios de este Sistema, e igualmente necesarios en cualquier caso para aprovechar la biomasa residual, como son los equipos de enfardado y las astilladoras. Lo más relevante es que tampoco se conoce en profundidad los rendimientos y los costes de estos equipos operando bajo las condiciones propias de las plantaciones uruguayas; una curva de aprendizaje que es necesario recorrer.

3.2.1 La aplicación de los Modelos para la bioenergía en el Uruguay

Como colofón de este epígrafe se presenta un escenario de la aplicabilidad de los diferentes Modelos en función de la realidad forestal del país:

Tabla nº 3.
Aplicabilidad de los Modelos para la bioenergía en Uruguay.

Destino	Operación	Región Litoral		Región Sur-Este		Región Centro-Norte	
		CTL	FT	CTL	FT	CTL	FT
Celulosa de eucalipto	Tala rasa (TR)	- Corteza - Enfardado - Astillado en cargadero - Transporte de restos	- Astillado en cargadero			- Enfardado - Astillado en cargadero	- Astillado en cargadero
Fibras y celulosa de eucalipto	Tala rasa (TR)			- Corteza - Enfardado - Astillado en cargadero			
Madera sólida	Tala rasa (TR)					- Enfardado - Astillado en cargadero	- Astillado en cargadero
	Raleos (R)					- Astillado en cargadero - Transporte de restos	

3.3 Los costes de la cadena logística de la bioenergía

Los modelos de costes que se presentan tienen carácter general, y pretenden ser una primera aproximación a la estructura de costes de la bioenergía a partir de residuos forestales en el Uruguay. Es conocido que las condiciones de trabajo en los montes son heterogéneas y que la variabilidad en costes de las operaciones forestales también lo es. Aún así, esta estimación es un ejercicio que nos permitirá categorizar los diferentes Modelos en función de su competitividad relativa en costes; un primer avance necesario para el impulso del desarrollo de la bioenergía en el Uruguay.

Los Modelos se determinan para unas hipótesis de operación que se consideran como grandes promedios en la realidad forestal del país, y así deben ser entendidos bajo las siguientes hipótesis:

1. No se han realizado evaluaciones directas de costes de los factores operativos: maquinaria y mano de obra. La información que se ha empleado proviene de comunicaciones personales durante la realización del presente Informe y de la bibliografía.
2. Se han adaptado los costes y los rendimientos para las operaciones que no se realizan hoy día en el Uruguay de operaciones similares en otras partes del mundo.
3. En muchas ocasiones se han empleado los costes y rendimientos obtenidos de experiencias homólogas en España.
4. Todos los costes empleados corresponden a métodos de trabajo con una curva de aprendizaje desarrollada, pero no adaptada a las condiciones particulares del Uruguay, por lo que es de esperar que se ajusten durante el propio progreso de la bioenergía en el país.

Con estos antecedentes se obtienen los siguientes costes promedio en planta para las siguientes hipótesis

- .. Distancia de transporte: 75 Km.
- .. Humedad de la biomasa: 40%.
- .. No se considera el coste de adquisición de la biomasa, únicamente los costes operativos para su aprovechamiento y transporte a planta.
- .. No se ha considerado en esta tabla los costes de los transportes de restos a largas distancias, ya que siempre es la opción menos competitiva.

Tabla nº 4.
Coste promedio en planta de los Modelos de Aprovechamiento más factibles en el Uruguay

<i>Modelos de Aprovechamiento</i>	Coste promedio en planta (USD\$/t)
CTL en eucaliptares para celulosa en el Litoral	45-50
CTL en eucaliptares para fibra en el Sur-Este	50-55
CTL corteza en eucaliptares	20-25
FT en tala rasa	25-30
CTL en raleos Centro-Norte	30-35

4 Sostenibilidad Ambiental

4.1 Calidad del recurso suelo

4.1.1 Impacto en el ciclo biogeoquímico y sobre la química de los suelos

Las plantaciones forestales realizan una elevada movilización de nutrientes entre el suelo y la biomasa aérea (absorción, circulación y reincorporación) a lo largo del turno de cultivo, aunque la proporción de éstos que es exportada tras la cosecha dependerá, entre otros, de las condiciones de cultivo, fertilidad del sitio, las prácticas silvícolas y régimen de aprovechamiento (Binkley, 1993). La remoción suplementaria de la fracción no maderable de los cultivos forestales implica un impacto por extracción de nutrientes y materia orgánica aún más significativo sobre la dinámica de los ciclos biogeoquímicos del sistema suelo-planta que inducen la extracción de madera tradicional en los cultivos forestales.

La distribución de la producción total de biomasa y la diferente concentración de nutrientes entre las distintas fracciones del árbol varían con la edad, el sitio, las prácticas culturales y la calidad del material vegetal. En función a su mayor acumulación de biomasa, los contenidos de nutrientes son mayores en plantaciones adultas y sitios de mayor calidad de estación (Brañas et al., 2000).

4.1.1.1 El balance en el suelo

La extracción de nutrientes es variable en función del tipo de manejo forestal. En el Uruguay, las plantaciones con destino celulósico tienen turnos de cosecha del orden de la mitad (10-11 años) que los turnos de las plantaciones con destino madera sólida para el aserrado (20-25 años), con el consiguiente efecto en la intensificación de la extracción de los nutrientes. También resulta una extracción de menor entidad en los raleos, en los que se extraen porciones menores de biomasa total de las plantaciones, aunque en este caso su mayor frecuencia indica que su efecto no sea despreciable.

Diversos trabajos realizados en la citada Facultad de Agronomía de la Universidad de la República (González, 2009) y (Hernández, J. et al., 2009) muestran como una elevada proporción de los nutrientes reside en las fracciones finas de las plantaciones de eucaliptos: hojas, ramas y corteza.

Tabla nº 5.

Distribución porcentual de biomasa y nutrientes en diferentes componentes de cosecha de *Eucalyptus* spp.

Componente	Biomasa %	% por componente					% TOTAL NUTRIENTES
		N	P	K	Ca	Mg	
Madera	70	27	<u>41</u>	18	17	34	27
Restos de cosecha	30	73	59	82	83	66	73
Hoja	4	<u>33</u>	22	15	8	10	18
Ramas	14	20	11	27	15	17	18
Corteza	12	20	25	<u>41</u>	<u>59</u>	<u>40</u>	37

Valores promedio para *E. globulus*, *E. maidenii* (González, 2009); y *E. dunnii* (Hernández et al., 2009). Se presentan subrayados los valores mayores en cada fracción.

Observamos la gran asimetría que se constata entre las fracciones con mayor porcentaje de biomasa y las que detentan el mayor porcentaje de nutrientes. En efecto, la madera constituye la mayor proporción de biomasa en los cultivos forestales, y su producción es la que se trata de optimizar mediante la selección de materiales genéticos idóneos para ello y mediante la aplicación de manejos silviculturales que incrementen su volumen total y su porcentaje sobre la biomasa total de la plantación. Sin embargo la función principal de la madera en el árbol es la de servir como sostén mientras que los procesos vitales esenciales como la nutrición, la fotosíntesis, el transporte de sustancias y agua, y el crecimiento se localizan en las partes verdes, en la corteza y en los anillos más jóvenes de crecimiento de la madera en el tronco. Como consecuencia estas partes activas acumulan la mayor parte de los nutrientes de la planta.

Es muy relevante considerar como en el aprovechamiento forestal tradicional de *Eucalyptus* spp. para celulosa se descortezaba en campo y se extrae únicamente la madera. La extracción de nutrientes es moderada, del 27% del total del contenido en el cultivo forestal. El porcentaje restante queda en el sitio y se reincorpora a velocidad variable a los ciclos biogeoquímicos que ocurren en el suelo. La extracción de las otras fracciones supone una fracción menor de la biomasa producida en el cultivo, pero sin embargo su impacto en la reducción de los nutrientes del sistema es mucho mayor.

Especialmente intensa es la extracción de nutrientes en el caso del aprovechamiento de la corteza. En este sentido es muy relevante la extracción del Ca, que conjuntamente con el contenido en la madera implica cifras cercanas al 75% del total acumulado en el dosel arbóreo. Es muy notable también el efecto de la extracción de las hojas; a pesar de suponer un porcentaje menor de la biomasa total aérea, un 4% de biomasa, llega a contener el 18% de los nutrientes con una muy alta proporción del N total.

Tras la revisión bibliográfica realizada y varias consultas y entrevistas realizadas a edafólogos de la Facultad de Agronomía, resulta claro que la extracción suplementaria de más biomasa del stand, tiene efectos intensos y significativos sobre la disponibilidad de los nutrientes en el suelo y sobre la propia química del mismo (Hernández, J. et al., 2010). Sin embargo, este hecho no significa *per sé* que se ponga en riesgo el recurso suelo y se altere su capacidad productiva potencial, o su resiliencia como sistema dinámico.

La literatura científica refiere que los suelos sometidos a un régimen de manejo intenso alteran su fertilidad y algunas propiedades fisicoquímicas relevantes como el pH. Sin embargo estos cambios no se provocan de manera homogénea en todo el perfil de suelo, y

en muy contadas ocasiones, y en función de la naturaleza intrínseca del suelo, revisten un carácter irreversible. En estos casos extremos, algunos tipos de suelos no pueden tolerar una extracción intensa y queda afectada su naturaleza, se degradan y puede considerarse que han sufrido un daño o una merma en su calidad y capacidad de uso. Esta degradación se traduce en un decremento de su fertilidad y en una afectación permanente sobre el rendimiento de las subsiguientes cosechas forestales. En la generalidad de los casos, esta no es la circunstancia de los suelos uruguayos.

Se acepta de manera general que los suelos más susceptibles a ser dañados por una extracción intensiva de nutrientes son aquellos suelos ácidos, con un pH inferior a 4,5, alto % de aluminio intercambiable, y con baja fertilidad natural y bajo Porcentaje de Saturación de Bases (PSB).

Tan importante como la remoción de los nutrientes del perfil del suelo resulta la remoción de la materia orgánica. El contenido de materia orgánica en el suelo resulta determinante para muchas de sus propiedades físicas y químicas, de importancia trascendental para su capacidad productiva: estructura y temperatura del suelo, porosidad, balance hídrico, humedad del suelo, fertilidad potencial, protección contra la erosión, micro flora y fauna edáfica, etc. Está constatado que una reducción del contenido de materia orgánica de los suelos provoca efectos negativos en su capacidad productiva (Vance, 2000). La retirada de nutrientes puede ser atajada mediante medidas compensatorias como la fertilización. Sin embargo no existe, hoy día, un método operativo en el ámbito forestal para compensar el efecto de la retirada de la materia orgánica.

Es preciso resaltar que este efecto negativo es más crítico en los eucaliptares, así como en cualquier otro cultivo forestal de turnos de cosecha muy cortos, de entre 10-12 años o inferiores. Se acepta generalmente que en los cultivos forestales el ingreso de materia orgánica hacia el suelo se inicia en torno a los cinco años de vida de la plantación, cuando los árboles empiezan a emitir sensiblemente hojarasca y ramillos procedentes de la poda natural del dosel hacia el suelo. De esta forma existe una mayor oportunidad de que se establezcan procesos eficientes de incorporación de materia orgánica en los manejos de turnos largos que en los cortos, en los que habrá que considerar con mayor cautela la evolución del contenido de materia orgánica tras la retirada de la biomasa residual.

4.1.1.2 El efecto de los Sistemas de Aprovechamiento maderero

Los Sistemas de Aprovechamiento forestal tienen una influencia significativa en el porcentaje de la biomasa residual que es susceptible de ser extraída de la plantación de manera complementaria a la madera. Es importante recordar que el objetivo principal de los cultivos forestales es, y seguirá siendo, la producción de madera industrial y hacia este propósito se optimizará la selvicultura y las técnicas de aprovechamiento. Por lo tanto los procesos para el aprovechamiento de la biomasa residual serán complementarios a los anteriores y determinados por ellos, como hemos tenido ocasión de revisar anteriormente.

Los principales Sistemas de Aprovechamiento mundialmente empleados en la producción maderera en cultivos forestales son los denominados *Cut to Length* (CTL) y *Full-Tree* (FT). Ya hemos visto que ambos Sistemas difieren esencialmente en que en el primero el procesado de la madera se produce *in situ*, en el interior del monte y que únicamente se extraen las trozas maderables, permaneciendo en campo el resto de las fracciones arbóreas. Sin

embargo en el sistema FT se extrae a cargadero de monte los árboles completos para ser procesados consecutivamente en ellos.

Como consecuencia ambos métodos de trabajo provocan disposiciones diferentes de las diferentes fracciones que conforman la biomasa residual durante la cadena de valorización de la madera, y diferentes aptitudes para ser aprovechadas en procesos y operaciones complementarias y adicionales.

El Sistema generalizado de cosecha forestal en el Uruguay es el Sistema CTL, mediante el cual permanecen sobre el terreno las fracciones no maderables de los árboles: puntas, ramas y corteza. El aprovechamiento de la biomasa residual que queda acordonada en el monte una vez extraída la madera no es completo, ya que este Sistema deja entre el 5-20% de la biomasa residual sin recoger en el campo. Esta cantidad de biomasa no se puede extraer como consecuencia de limitaciones tecnológicas en la colecta de los residuos por parte de la maquinaria específica empleada para ello. Aún así la extracción de la biomasa acordonada que se consigue no deja de ser un cambio significativo con respecto a la situación previa de permanencia de los residuos forestales sobre el suelo.

El escenario es diferente cuando se aplica un Sistema de Aprovechamiento FT. En este sistema se consigue extraer del monte hasta el 95% de la biomasa total presente. Este Sistema es poco utilizado hoy día en Uruguay, pero es muy posible que incremente su implantación paulatina conforme se consolide el aprovechamiento de la biomasa forestal en el país. En este caso resultará más crítico evaluar convenientemente los efectos que se producirán sobre los suelos.

Entendemos ahora el impacto potencial y diferencial de los distintos Sistemas de Aprovechamiento considerando un uso energético y adicional de los residuos. La aplicación de procesos FT poseen potencialmente mayor capacidad de disrupción de los ciclos biogeoquímicos como consecuencia del mucho mayor porcentaje de biomasa que son capaces de retirar con respecto a los Sistemas CTL.

4.1.2 Inducción de procesos erosivos

La erosión es uno de los mayores riesgos de degradación a los que se enfrentan los suelos manejados y deben ser prevenidos. Los procesos erosivos más severos pueden conducir a su destrucción total y a su pérdida como recurso natural, pero incluso bajas tasas de erosión pueden reducir drásticamente la calidad de los suelos. Recordemos que los horizontes más superficiales del suelo son las que determinan su fertilidad, actividad biológica y capacidad productiva, y que son los primeros expuestos a ser arrastrados por la erosión.

No todos los suelos presentan la misma susceptibilidad ante los agentes erosivos. Esta susceptibilidad depende en gran medida de la estructura y de la textura intrínseca del suelo, las cuales determinan en gran medida otras características críticas como son la permeabilidad y la erodabilidad. Otros factores determinantes de la erosión son la frecuencia e intensidad de la lluvia (erosividad), la pendiente y longitud de ladera en la que se sitúan los suelos y la cubierta vegetal. La cubierta vegetal no solo actúa evitando el impacto directo de las gotas de lluvia sobre el suelo mineral y regulando la escorrentía superficial, sino que también aporta materia orgánica lo que favorece a su vez la porosidad y la retención de agua en el perfil.

Se identifican tres procesos con trascendencia en el incremento de la vulnerabilidad de los suelos a ser erosionados como consecuencia de la retirada de la biomasa residual:

1. Incremento del riesgo de erosión hídrica por reducción de la cobertura del suelo.
2. El efecto de la circulación de la maquinaria forestal sobre el suelo mineral.
3. El incremento del tránsito de maquinaria en el monte.

4.1.3 *Riesgos de compactación*

La compactación del suelo es junto con la erosión uno de los principales riesgos de degradación severa a los que se exponen los suelos forestales manejados. La compactación del suelo es provocada por el tránsito de maquinaria pesada en el monte, y consiste en un incremento de la densidad del horizonte superficial, una reducción de su porosidad y empobrecimiento de la aireación. La compactación afecta drásticamente al desarrollo de las raíces, precisamente en el perfil del suelo más dinámico y en el que se concentran la mayor parte de los nutrientes del sistema. Se trata de un riesgo serio que provoca importantes pérdidas de producción forestal en los casos en los que no se controla.

La compactación disminuye también la permeabilidad del perfil provocando un mayor escurrimiento y favoreciendo adicionalmente la erosión.

Es fácil colegir desde los epígrafes anteriores que tanto el incremento de la circulación de más maquinaria sobre los suelos, como el hecho de que ésta comience a transitar directamente sobre el suelo mineral (y no sobre una cama de residuos como hasta ahora), así como la implementación de Sistemas FT, impactan directamente sobre el riesgo de compactación de los suelos.

Este efecto provoca mayores peligros en los cultivos con eucaliptos, dado que estas especies son muy sensibles, y no pueden desarrollar apropiadamente sus sistemas radiculares en suelos compactados.

Es preciso evaluar convenientemente este efecto en los sistemas de aprovechamiento de la biomasa que se implementen, pero es muy posible que en suelos con alto peso específico relativo y texturas arcillosas se desaconseje estas prácticas, especialmente en los eucaliptares en los que se pretenda manejar el rebrote, y siempre en condiciones de humedad en el suelo.

4.2 *Calidad de los recursos hídricos*

En el manejo forestal la preservación de la calidad de las aguas de la cuenca está íntimamente relacionada con la prevención de la erosión.

La cosecha maderera puede provocar la emisión de sedimentos a las aguas fluviales y una reducción drástica de su calidad, así como impactos severos en los ecosistemas acuáticos. Estos daños se pueden evitar en gran medida mediante la aplicación de medidas preventivas que son conocidas. El riesgo está por lo tanto muy correlacionado con la activación de

procesos erosivos, y como ellos, depende también de factores intrínsecos de la cuenca y de sus suelos como son: los tipos de suelos predominantes, el clima, la topografía, la cobertura de la cuenca, etc. Es preciso recordar que incluso cuando el manejo forestal se traduce en una pérdida de la calidad de las aguas, la misma suele revestir carácter temporal y limitado a la recuperación de la cobertura arbórea en las nuevas plantaciones forestales.

Resulta obvio que el grado en que la retirada de la biomasa residual resultará en un incremento del riesgo de pérdida de calidad de las aguas, es concomitante con la erosión de los suelos que se provoque y la sedimentación posterior en los cursos de agua, independientemente de los efectos generados por la cosecha maderera tradicional.

Resulta menos obvia que la extracción de la biomasa puede provocar también efectos de contaminación de las aguas de manera indirecta, como consecuencia de la fertilización suplementaria que pudiera ser necesaria. En este caso, si la fertilización que se aplica en la plantación para compensar la extracción de nutrientes con la biomasa se aplica inapropiadamente (exceso de fertilización nitrogenada y fosfórica, fertilización en suelos encharcados, cerca de cursos de agua y pozos, fuera de la época de crecimiento activo de la plantación, en suelos en fuerte pendiente, con clima lluvioso, etc.) se corren riesgos considerables de eutrofización de las aguas superficiales y subterráneas.

El aprovechamiento de la biomasa residual está ineludiblemente asociado al aprovechamiento maderero, y por lo tanto a las mismas prácticas y medidas mitigatorias que se aplican para la preservación de la calidad de las aguas en los cultivos forestales hoy día. En este sentido resulta de plena aplicación las recomendaciones contenidas en el Código Nacional de Buenas Prácticas Forestales (MGAP, 2004).

4.3 Balance de carbono

Una diferencia importante que distingue a la bioenergía del resto de las energía renovables como la solar o la eólica, es que no solamente presenta un balance positivo en emisiones GEI con respecto a los combustibles fósiles, si no que actúa secuestrando activamente el CO₂ de la atmósfera y no solamente evitando su emisión. Esto hace a la bioenergía especialmente interesante como método de revertir las emisiones GEI a la atmósfera y luchar contra el Cambio Climático.

Cuando la biomasa es producida conforme a los criterios de la GFS se puede afirmar que el carbono circula en un circuito cerrado sin que el uso energético de los residuos forestales contribuya a un incremento neto del CO₂ atmosférico. Con este condicionante, la biomasa forestal residual es prácticamente neutral en emisiones GEI y solamente una pequeña proporción de combustible es necesaria para valorizar la biomasa desde su recolecta en monte, transporte y procesado (astillado) hasta que está lista para su combustión en la caldera de la planta de energía. Cada tonelada generada de biomasa captura en su crecimiento entre 0,9 y 1,6 t de CO₂/año (dependiendo de la humedad). Por ejemplo, con una central de generación eléctrica de 5 MW se evita la emisión a la atmósfera de unas 14.000 t/año de CO₂ a partir de combustibles fósiles.

Aunque el balance de CO₂ de la biomasa forestal residual es prácticamente nulo, sí existen importantes diferencias con respecto al ratio de emisiones y el rendimiento energético total. Esto depende de las aplicaciones energéticas a las que se destine la biomasa. Las

aplicaciones térmicas son las que presentan mejor balance final, del orden del 90-100%, mientras que en la cogeneración se puede alcanzar rendimientos de hasta un 90% y en los usos eléctricos un 30%.

Es importante destacar que el balance de carbono será más favorable cuanto mayor sea la densidad energética de la biomasa forestal residual. De este modo se mejora enormemente el ratio de la energía y de las emisiones de CO₂ inducidas durante la cadena logística de la biomasa, y la energía y las emisiones generadas por su combustión en la planta. A este respecto la gestión de la humedad es esencial, ya que transportar agua únicamente repercute en mover peso inútil que implica emisiones atmosféricas innecesarias.

4.4 Sanidad y autodefensa contra incendios forestales

En estos momentos los residuos se dejan dispersos en el monte sin ninguna operación adicional para su procesado, eliminación o incorporación al suelo, hasta que se descomponen por si solos. Esta práctica genera riesgos de incendios, especialmente en el caso de los pinares, donde las cargas de combustible son mayores que con respecto a los eucaliptares.

En entrevistas con DINAMA (MVOTMA) se apunta a la ventaja de que su retirada tiene efectos muy positivos en la mitigación del riesgo y de la intensidad de los incendios. Este efecto es especialmente relevante en los raleos en los pinares, en los que después de realizadas estas operaciones silvícolas se induce una continuidad vertical de los combustibles, y un decrecimiento sensible de la capacidad de autodefensa de la plantación frente al fuego.

La extracción de residuos (incluso madera de trozas descartadas en el aprovechamiento maderero) tiene un efecto general positivo sobre los riesgos fitosanitarios en las plantaciones. El abandono de cantidades importantes de biomasa, y especialmente de ramas y trozas de madera con corteza, induce la proliferación general de variadas plagas que afectarán posteriormente a los árboles en pie.

Este efecto es especialmente relevante en la proliferación de *Phoracanta* spp. en los eucaliptares en los que se deja abandonada trozas de madera con corteza.

5 Los diferentes escenarios en el Uruguay

5.1 Subsistemas Forestales generadores de biomasa forestal residual

A los efectos de la disponibilidad potencial de biomasa residual para bioenergía distinguimos tres Subsistemas Forestales generadores diferentes.

5.1.1 Los eucaliptares para celulosa en el Litoral

Se trata de las grandes superficies de eucaliptares propiedad de las grandes corporaciones que producen celulosa en Paysandú, Río Negro y Soriano; más de 170.000 ha. Vemos que se trata de plantaciones muy concentradas en muy pocos operadores que detentan el recurso madera y biomasa.

Las especies predominantes son *Eucalyptus grandis* y *E. dunnii*, mientras que las plantaciones de *E. globulus* y *E. maidenii* están en regresión, al igual que ocurre con las plantaciones de pino.

La biomasa residual que generan corresponde a los restos no maderables (corteza, ramas y la copa o punta) al turno de corta, típicamente cada 8-12 años.

Se trata de plantaciones muy optimizadas tecnológicamente para la producción de madera, tanto por la silvicultura que se aplica, como por el material genético y los Sistemas de aprovechamiento maderero. Considérese que se aprovecha el fuste hasta los cinco centímetros de diámetro en punta delgada. Su principal distintivo reside en que producen poca biomasa residual en comparación con la fracción madera. Se ha estimado que los residuos forestales generados por este tipo de plantaciones son inferiores al 20% del peso total de la madera extraída.

Otras características importantes de este Subsistema son las siguientes:

1. Se aplican Sistemas CTL con descortezado en campo, por lo que la corteza queda en el suelo como residuo forestal junto con las copas. Actualmente esta biomasa no se aprovecha y se emplea de cama para la circulación sobre ella de la maquinaria durante la cosecha de madera.
2. Plantaciones integradas en Foresto-Industria.
3. La mayor parte de la biomasa residual generada es corteza, aproximadamente entre un 13-14% de los residuos de corta.
4. La calidad de la biomasa residual es de media a baja, con una alta proporción de corteza y hojas.
5. Para todos los actores resulta crítico el mantenimiento de las certificaciones GFS que detentan actualmente.

5.1.2 *Los eucaliptares para fibra en el Sureste*

Comprende las plantaciones en los Departamentos de Rocha, Florida, Lavalleja, Maldonado, Treinta y Tres y parte de Cerro Largo, con más de 100.000 ha. Estas regiones son las más idóneas para el cultivo de madera de celulosa con *Eucalyptus globulus*, que es la especie predominante junto con el *E. maidenii*.

Estas maderas son las más valoradas para la producción de celulosa, por sus características tecnológicas (densidad básica y consumo específico entre otras) pueden viajar bien y son las preferidas para ser exportadas al extranjero desde las plantas de astillado de Montevideo.

A diferencia del Subsistema anterior la propiedad está mucho más distribuida, y son varios fondos de inversión internacionales los que detentan las mayores superficies, conjuntamente con muchos propietarios particulares con tamaños de propiedad media y pequeña.

La biomasa residual que generan corresponde también a los restos no maderables al turno de corta cada 10-12 años.

Igualmente se trata de plantaciones muy optimizadas tecnológicamente para la producción de madera. Producen incluso menos biomasa residual que el Subsistema Forestal Litoral, ya que los crecimientos de estas plantaciones son como promedio inferiores y generan menos residuos. La cantidad generada es también inferior al 20% del peso total de la madera extraída.

Otras características importantes son las siguientes:

1. Se aplican también Sistemas CTL con descortezado en campo.
2. Menor nivel de integración en Foresto-Industria, y muy orientado al mercado internacional de exportación de astillas.
3. La mayor parte de la biomasa generada es corteza, aproximadamente entre un 13-14% de los residuos de corta.
4. La calidad de la biomasa residual es de media a baja, con una alta proporción de corteza y hojas.
5. Para todos los actores resulta crítico el mantenimiento de las certificaciones GFS que detentan actualmente.

5.1.3 *Los pinares y eucaliptares para madera sólida en el Centro-Norte*

Se trata de las plantaciones para madera sólida de calidad de Rivera, Tacuarembó y Cerro Largo. Entre todos estos Departamentos la superficie alcanza las 240.000 ha.

El espectro de operadores es moderado. Conviven los fondos de Inversión Internacionales, junto con empresas transformadoras integradas y productores particulares.

Las especies predominantes son el *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* manejados a turnos de entre 18-25 años. En las cortas finales de estas especies se genera mayor cantidad de residuos debido a tres efectos:

- Se alcanzan mayores existencias de madera final por superficie (m^3/ha), y en consecuencia es mayor la cantidad de restos vegetales.
- Estas plantaciones presentan mayor porcentaje de copas y ramas, y es mayor la proporción de residuos generados con respecto a la madera producida.
- El uso para madera sólida exige que pueda quedar en el campo determinadas trozas de diámetro inferior a 18 cm en punta delgada, que en un momento pueden no tener salida comercial.

En las cortas finales de pinos se estima que el 25% en peso de la madera extraída queda en el campo como residuo.

A diferencia también de los Subsistemas anteriores que generaban biomasa residual únicamente al turno de corta, la selvicultura en estas plantaciones aplica de uno a tres raleos que causan también una importante cantidad de residuos. A esta circunstancia contribuye que en muchos raleos solamente se aprovecha una parte de los diámetros mayores por cuestiones operativas y de costes, y quedan en abandonados en el monte como un resto más.

Otras características destacables son las siguientes:

1. Se aplican Sistemas de *CTL* y *FT*. Los primeros son mucho más habituales que los segundos, pero frente al desarrollo de la bioenergía es de prever que el *FT* incremente progresivamente su implantación en las cortas finales.
2. Apreciable nivel de integración en Foresto-Industria.
3. Son las plantaciones que generan las mayores tasas de biomasa residual y de gran calidad.
4. Los raleos son fuentes importantes de biomasa en estas plantaciones.
5. La mayor parte de la biomasa generada es madera fina y copas. La madera se aprovecha con corteza en general, por lo que ésta no queda disponible como biomasa forestal residual (se consume no obstante como combustible en las industrias).
6. La calidad de la biomasa residual es de media a alta, con una alta proporción de leño.
7. Los eucaliptares para celulosa están en acelerada expansión (ante la próxima apertura de la nueva planta de Montes del Plata en 2013), mientras que los pinares de madera sólida están en regresión debido a la caída de la demanda internacional por la crisis en EEUU y en Europa.
8. Para todos los actores resulta crítico el mantenimiento de las certificaciones GFS que tienen actualmente.

5.2 Tendencias probables ante estas realidades

La calidad, la cantidad, y el coste de la biomasa forestal residual en cada Subsistema son distintos, por lo que los desarrollos energéticos que se diseñen en cada uno de estos escenarios deberán adaptarse a ellos para ser eficientes y viables económicamente.

Se presentan las líneas de evolución de la bioenergía que se consideran más plausibles en cada uno de los escenarios presentados.

5.2.1 Los desarrollos energéticos en el Litoral

Serán liderados preferentemente por las grandes corporaciones productoras de pasta de celulosa. Estas empresas disfrutan de una posición inigualable para ello en esta Región, y es cuestión de tiempo que se consolide la bioenergía.

En primer lugar son los propietarios de la biomasa residual, y poseer el recurso resulta de por sí una ventaja competitiva de primer orden.

En segundo lugar, ambas empresas operan en continuo sus plantas de celulosa, por lo que la cosecha de madera sigue un patrón muy regular a lo largo del año, y de igual modo sucederá con la generación de los residuos. Esta regularidad es muy importante para las plantas de generación de energía, que deben operar también bajo un régimen regular y en continuo para ser eficientes. Para ambos actores estar integrados en la Foresto-Industria les permitirá aprovechar esta gran sinergia entre el suministro regular de madera y de residuos forestales.

Y en tercer lugar e igual de importante, ambas compañías pueden conseguir con más facilidad que las demás la integración del aprovechamiento de la biomasa en sus propios circuitos logísticos, ya en funcionamiento para la madera.

Una línea de desarrollo interesante puede ser aprovechar la corteza únicamente, prescindiendo de la fracción de biomasa de menor calidad: las copas. Para ello se puede aprovechar la madera con corteza con el Sistema CTL. Hemos visto como en estas plantaciones se genera poca biomasa residual y de media a baja calidad. Debido a que la mayor parte de la biomasa producida es corteza, resulta sencillo aprovecharla manteniendo el Sistema CTL sin descortezar, y derivando el descortezado a las plantas. En este esquema las plantas de energía obviamente se localizarían en las mismas plantas de celulosa. Las calderas de cortezas llevan operando y generando energía sin problemas desde hace décadas, y son frecuentes en muchas plantas de celulosa en el mundo.

Revisamos anteriormente esta opción para el aprovechamiento de la corteza con sus ventajas e inconvenientes. Recordemos que el principal inconveniente viene derivado de las ineficiencias que se generan por el transporte de la madera en verde. Como consecuencia habrá biomazas de corteza de orígenes cercanos que lleguen en precio a las plantas. Sin embargo, para otros orígenes más alejados no será económicamente viable y persistirá el método actual de aprovechar la madera sin corteza para transportarla lo más seca posible.

En este esquema no serían necesarios cambios drásticos en los procesos actuales en la fase forestal, pero sí realizar inversiones en una descortezadora fija en las plantas.

5.2.2 *Los desarrollos energéticos en el Sureste*

Aunque en principio pudiera pensarse que la situación es similar a la del Subsistema Forestal litoral, las opciones son completamente diferentes.

Al igual que en el caso anterior, la mayor parte de la biomasa residual producida es corteza, por lo que cualquier desarrollo energético ha de considerarla también de un modo u otro. Sin embargo, al no haber un tan alto grado de integración entre la Foresto-Industria, es más difícil que pueda llegar la biomasa a bajo coste a los generadores, porque la corteza no aprovecharía la cadena logística de la madera como en el caso anterior al tratarse de operadores diferentes a priori.

Una opción plausible sería que las plantas de astillado para la exportación sean las que recepcionen a su vez la corteza para valorizarla en plantas de energía anejas. En este caso el esquema sería parecido al del Litoral pero presentaría mayores inconvenientes:

1. El ritmo de suministro de la biomasa estaría condicionado por las exportaciones internacionales de astillas, y no sería posible por consiguiente asegurar un suministro estable a la planta generadora, habida cuenta de la volatilidad de este mercado de exportación.
2. Estas plantas de energía deberían estar situadas en las inmediaciones de Montevideo, donde no parece posible que se pudiera complementar el suministro de corteza con otros tipos de biomasa forestales. Considerando también la alta demanda y el alto precio que tiene en Montevideo la leña para uso doméstico y la lejanía a las plantaciones forestales en general.
3. La astilla de exportación necesita estar lo más seca posible para evitar falsos fletes. Sería preciso diferir el descortezado en verde del astillado posterior de la madera durante semanas, lo que genera sobrecostos de manipulación y de almacenamiento, y problemas de acopio en las plantas.

A parte de estas opciones de integración de la logística de la astilla con la de la madera para viabilizar la bioenergía, el aprovechamiento integral de la biomasa residual y el surgimiento de un mercado en el Sureste parece mucho menos probable bajo las condiciones actuales del precio de la energía en el Uruguay.

5.2.3 *Los desarrollos energéticos en el Centro-Norte*

Al igual que en el Litoral, las compañías integradas en Foresto-Industria son los llamados en primer lugar a desarrollar la bioenergía en la Región, y de hecho ya están aprovechando residuos foresto-industriales (la corteza y los residuos del procesado de la madera en sus plantas) para usos térmicos y eléctricos. Los fondos de inversión con extenso patrimonio forestal se encuentran en una segunda posición, y con dificultades parecidas a las descritas en el Sureste; no se pueden asegurar un suministro regular de biomasa ya que su producción depende de la madera que comercializan a los integrados en Foresto-Industria, que cuentan con esta importante ventaja ante ellos.

Una diferencia crítica con el resto de los Subsistemas reside en que la mayor parte de la biomasa forestal residual generada no es corteza, por lo que la situación es muy diferente a las comentadas anteriormente en el Litoral y en el Sureste. Dada la calidad y la cantidad de la biomasa que se genera en este Subsistema, no sería preciso conseguir la integración del aprovechamiento de la biomasa residual con el circuito logístico de la madera como la mejor estrategia para su valorización. Como consecuencia, pueden surgir generadores no integrados con la Foresto-Industria actual que operen su propia planta de energía, y que adquieran la biomasa que requieren en un mercado que cotice libremente. Esto puede ocurrir en cuánto se salven las barreras que persisten en general para el desarrollo de la bioenergía en Uruguay.

En cualquier caso, todos estos operadores estarán sometidos al hecho de que es la demanda de la industria de la madera sólida la que moviliza la disponibilidad de la biomasa. A este respecto también existe una volatilidad que juega en contra de los desarrollos energéticos en el Centro-Norte frente a los del Litoral, donde la producción de celulosa es más regular. De hecho en estos momentos y debido a la crisis de la demanda en Europa y Estados Unidos, la principal productora de paneles de la región está operando al 70% de su capacidad nominal.

El reto en este caso es innovar y aplicar los Sistemas Integrados de Aprovechamiento Madera-Biomasa que permitan aprovechar la biomasa con un coste optimizado.

6 Barreras identificadas y riesgos: medidas para promover el uso de la bioenergía

Bajo las actuales circunstancias en el Uruguay, las iniciativas empresariales para desarrollar proyectos de bioenergía con residuos forestales no se están desarrollando con la facilidad que se preveía en las políticas de incentivos públicas.

La estrategia del Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM), consiste en retribuir la energía eléctrica con un precio superior a la generada con otras tecnologías. De este modo se pretende reconocer vía precio su especificidad, las dificultades logísticas y el coste que supone la movilización de la biomasa hasta las plantas. Sin embargo ni el Decreto 389/005, ni el Decreto Nº 77/006, para la compra de energía eléctrica a empresas privadas ya sean co-generadores o productores independientes, ni en el más reciente Decreto 367/010, se diferencia entre los diferentes tipos de biomasa: residuos forestales, residuos agrícolas, residuos industriales, etc. Como consecuencia el potencial mercado de las biomásas no se encuentra segmentado, y la biomasa forestal residual encuentra dificultades para competir en costes con los otros tipos de biomásas en el entorno actual de precios de la energía.

Revisando los siguientes epígrafes estaremos en condiciones de entender:

- .. Porqué les resulta a los generadores actuales tan difícil acceder a la biomasa forestal bajo condiciones de costes adecuadas.
- .. Porqué será difícil en el actual escenario el objetivo nacional de conseguir la instalación de 200 MWe en 2015, establecido por la Dirección General de Energía (MIEM).
- .. Los aspectos que deben ser revisados para transformar estos riesgos en una oportunidad.

6.1 Evaluación de las externalidades ambientales

La bioenergía en el Uruguay afronta incógnitas con respecto a la sostenibilidad del recurso suelo. Con la información disponible parece que el suelo puede ser el mayor afectado por la extracción intensa de la biomasa desde los bosques. En segundo lugar también pueden preverse afecciones a la calidad de los recursos hídricos.

El suelo es el principal recurso natural del país, por eso tiene también un impacto socioeconómico muy importante evaluar convenientemente los efectos sobre la productividad de los suelos que inducirán los nuevos usos de la bioenergía.

Esta realidad es percibida por los gestores forestales, que estarían dispuestos a introducir la bioenergía en el manejo de los bosques y de las plantaciones forestales, pero cuando dispongan de información científica contrastada y avalada por la Administración que disipe las dudas. Recordemos que la bioenergía es un uso complementario a la producción forestal y por lo tanto su implantación no puede generar dudas, ni poner en riesgo los objetivos productivos principales de los bosques.

Estas incógnitas son percibidas por los productores forestales como un riesgo para su modelo de gestión actual, y por lo tanto una barrera real para la implantación de los usos de la bioenergía de manera extensa.

6.2 *Curva de aprendizaje: Ausencia de modelos de manejo adaptados*

Tras 20 años de vida el sector forestal maderero uruguayo es pujante y se mantiene como una de las referencias forestales mundiales. Ya hemos visto como se trata de un sector muy especializado en la producción de madera de eucalipto para celulosa, y de eucalipto y pino para madera sólida. Esto le proporciona una posición inmejorable para incorporar a la bioenergía como una utilidad más de los bosques, pero este avance no está exento de dificultades.

Las principales dificultades se localizan en la ausencia de modelos de manejo para la bioenergía adaptados a la realidad forestal uruguaya. Tras las diversas entrevistas cursadas con diferentes actores forestales (empresas integradas en Foresto-Industria, empresas de servicios, fondos de inversión, etc.), se constata el gran interés que despierta la bioenergía en el sector como una nueva área de negocio complementaria a la producción de madera. Sin embargo los actores demandan información profesional sobre el manejo, las operaciones y las inversiones que deben afrontar para abordar el aprovechamiento de la biomasa residual. Todos ellos entienden la bioenergía en términos de modelo de negocio, y demandan el conocimiento preciso para poder evaluar la rentabilidad y el impacto económico de este uso en la empresa.

Aunque existe un conocimiento general de cómo se aprovecha la biomasa forestal residual en Europa y en Norteamérica, no se cuenta hoy día en el Uruguay con la experiencia necesaria para adaptar las operaciones y equipamientos desarrollados en otros lugares. Por lo tanto, resulta preciso trabajar en primer lugar en innovar los desarrollos existentes a la realidad del país, y adaptarlos y mejorarlos posteriormente para optimizar su eficiencia.

6.3 *El marco normativo regulador*

El impulso en Uruguay a la bioenergía es un impulso público, sustentado por el Estado mediante incentivos económicos para hacer atractiva la generación de energía eléctrica por parte de empresas interesadas en este negocio. Esta política pública es similar en sus fundamentos a la que se sigue en Europa, y no por obvio es esencial señalar que no es el Estado el que por sí mismo promueve la bioenergía; renuncia a esta promoción directa mediante un marco retributivo en aras a que sean las empresas las que asuman los riesgos de mercado y desarrollen los proyectos. Por supuesto, es preciso que en la evaluación de riesgos/rentabilidad de los proyectos, las empresas encuentren razonablemente interesante el negocio de la bioenergía frente a otras opciones de inversión, y esto no ocurre hoy día en el Uruguay.

El más reciente marco retributivo a la generación eléctrica con biomasa forestal residual no es percibido como el adecuado frente a los riesgos, al desconocimiento y a las dificultades logísticas a la que se enfrenta el suministro permanente y continuado de una planta eléctrica

con biomasa. Los operadores entienden que el nivel de inversión que requiere una planta de este tipo no se encuentra respaldado con la retribución actual al MWh eléctrico generado. Especialmente cuando se constata que el sector forestal no está preparado para el suministro eficiente de las cientos de miles de toneladas que se precisan, y que a su vez es incuestionable una inversión adicional en la cadena forestal para desarrollar la logística y dotarla de los equipamientos precisos para hacerla posible.

Hemos visto también como los diferentes Modelos de costes para la bioenergía arrojan resultados que indican que a gran escala el aprovechamiento de la biomasa forestal residual debe soportar costes no despreciables. Esto es, puede resultar sencillo encontrar biomásas forestales baratas en un momento dado, pero no es la generalidad, considerando que las plantas de energía no cuentan con un factor de escala favorable (cuántas mayores necesidades de biomasa más preciso es ir a buscarla lejos y mayores son los costes de transporte).

Adicionalmente también aparecen dificultades estructurales respecto a la posesión de la biomasa en el país. En el caso de los generadores que no dispongan de patrimonio forestal propio para garantizar el suministro continuo de la biomasa, estos deben realizar un mayor esfuerzo de mercado para garantizar el suministro permanente de las plantas y su acceso a la biomasa de mercado también se dificulta.

Como consecuencia de lo expuesto, debemos entender que el promotor de la cadena de valor de la bioenergía es el precio incentivado del MWh, y que un precio no ajustado a las condiciones reales del sector forestal impedirá que se desarrollen los emprendimientos con biomasa como han sido planificados por la Dirección General de Energía (MIEM) para 2015.

6.4 Capacitación y formación laboral

Esta barrera es fácilmente salvable dada la profesionalidad y la existencia de cuadros técnicos formados en el sector forestal uruguayo. Gran parte de los mandos intermedios, y de base, de las empresas forestales cuentan ya con formación académica superior, y se cuenta en el país con escuelas de capacitación profesional que proveerán de formación específica a los nuevos profesionales que se incorporen a la bioenergía. Este punto de partida permitirá que sean más fácilmente incorporados los conocimientos técnicos precisos para el desarrollo de la bioenergía en el Uruguay.

No obstante será necesaria una formación muy especializada en el manejo de la maquinaria específica de los procesos propios de la biomasa residual. Entre ellos destaca la formación en el manejo de las enfardadoras y astilladoras forestales, y en la operativa de la logística de las astillas (un granel), como las más singulares.

Mención especial merece la formación que se precisa sobre la gestión de la humedad de la biomasa, y sobre su calidad como combustible en general.

6.5 Necesidad de generar nuevo conocimiento científico

El lanzamiento de líneas de investigación es clave para obviar paulatinamente las lagunas de conocimiento y las diversas incógnitas que surgen cuando se quiere desarrollar la bioenergía en el país.

Son variados los temas que precisan un esfuerzo investigador por parte de los organismos nacionales acreditados para ello. La implantación de la bioenergía se facilitará cuando los organismos públicos de investigación uruguayos provean a los agentes del sector forestal de información científica contrastada y objetiva, que les permitan tomar decisiones empresariales fundamentadas.

Es muy importante que esta producción científica sea acometida por organismos estatales solventes y de reconocida autoridad en su sector, como mejor estrategia para que puedan ser aceptadas como referencias fiables por los actores forestales uruguayos. Recordemos que estos son los llamados a desarrollar la bioenergía en el país.

Resulta necesario abordar con cierta urgencia acciones que permitan avanzar hacia un conocimiento adecuado de los diferentes Modelos de la bioenergía para minimizar el potencial impacto ambiental por un lado, y que desvelen las sinergias o incompatibilidades del uso energético de la biomasa residual con la producción maderera de los montes.

6.6 Compatibilidad con los Sistemas de Gestión Forestal Sostenible (GFS)

Ya se ha destacado como el aprovechamiento de la biomasa residual implica su evolución a ser considerada como un nuevo producto (o subproducto) obtenido mediante gestión forestal de los bosques, y como tal, los Esquemas de Gestión Forestal Sostenible FSC y PEFC los consideran un bien más, similar en cuanto a su concepción a la madera, miel o cualquier otro producto de la fase forestal.

En consecuencia, la Certificación de un monte exigirá que sobre la producción de biomasa para uso energético se apliquen los mismos estándares, y validación de principios y criterios, que se emplean actualmente sobre la madera y resto de productos forestales. Este hecho induce resistencia ante los gestores forestales que detentan las masas certificadas, ya que existe desconocimiento sobre los efectos ambientales y la sostenibilidad específica de la bioenergía, y que resulta en impactos acumulados con los del aprovechamiento tradicional, ya que no se origina de forma aislada de éste.

Es preciso progresar en desvelar estas incógnitas sobre la sostenibilidad de los nuevos procesos, así como avanzar con respecto a nuevos indicadores, que permitan evaluar más objetivamente su compatibilidad con los criterios de GFS. Para ello es preciso iniciar actividades de investigación específicas por parte de las instituciones de investigación nacionales prestigiadas para ello.

Es muy necesario recordar que la biomasa forestal residual es un subproducto que se incorpora a los sistemas actuales de gestión, y su valorización no puede en ningún caso poner en riesgo la certificación forestal del principal producto forestal hacia el que se dirige la gestión de las plantaciones: la madera.

7 Conclusiones

1. Uruguay presenta condiciones como para que el aprovechamiento de la biomasa forestal residual (bioenergía) pueda desarrollarse y contribuir efectivamente a la soberanía energética nacional y a la lucha global contra el Cambio Climático.
2. El aprovechamiento de la biomasa residual provocará migrar hacia un concepto de APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE LA MADERA Y LA BIOMASA.
3. La bioenergía gira en torno a conceptos esenciales como son los de: subproducto, gestión de la humedad, calidad de los combustibles, aseguramiento del suministro a las plantas de energía, y competitividad frente al empleo de combustibles fósiles alternativos.
4. Existen paquetes tecnológicos y logísticos que pueden implementarse en el corto plazo en Uruguay para el desarrollo de la bioenergía, y un recorrido de mejora para el conjunto de las tecnologías.
5. No existe una solución técnica única para el aprovechamiento de los residuos forestales. Cohabitarán diferentes Modelos de Aprovechamiento en función del destino productivo principal de la plantación (celulosa o madera sólida) y la especie en cuestión de que se trate.
6. Entre estos paquetes tecnológicos destacan las tecnologías para el enfardado de los residuos y para su astillado.
7. Existe una corresponsabilidad compartida entre todos los agentes responsables llamados a desarrollar el sector energético de la biomasa forestal en Uruguay: Ministerio de Industria Energía y Minería, Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca, Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, conjuntamente con el sector privado.
8. Esta corresponsabilidad es necesaria por parte de las compañías para mejorar los costes y los procesos de la bioenergía, y también por parte de la Administración que debe impulsar este proceso y adoptar las medidas adecuadas (retribución al MWh, retribución diferencial a los distintos tipos de biomasa, investigación y desarrollo, etc.) para hacerlo posible.
9. La heterogeneidad del sector forestal uruguayo determinará que los desarrollos energéticos sean de diferente naturaleza entre la región Litoral, el Centro-Norte y el Sureste.
10. Es importante reevaluar el modelo de retribución a la generación eléctrica con biomasa en Uruguay, pero también los interrogantes sobre cómo implementar los NUEVOS PROCESOS que se requieren con eficiencia y eficacia.
11. Entre las principales barreras identificadas para el desarrollo de la bioenergía se encuentran la evaluación de sus externalidades ambientales, y la necesidad de experimentar la curva de aprendizaje de los distintos Modelos de manejo identificados.

12. En estos momentos las barreras impiden que se esté desarrollando la bioenergía activamente, y los operadores están poco interesados en asumir los riesgos que implica esta nueva área de negocio forestal.
13. Debemos entender que queda todavía un importante camino por recorrer para hacer factibles los desarrollos energéticos con biomasa en Uruguay, y que es responsabilidad de todos los integrantes de la cadena de valor conseguirlo.

8 Bibliografía

BRAÑAS J. 2000. Biomasa maderable y no maderable en plantaciones de eucalipto. Cuantificación y estimación. Revista CIS-Madera.

BINKLEY, D. 1993. Nutrición forestal. Prácticas de manejo. Editorial Limusa.

GONZÁLEZ, A. 2009. Extracción y reciclaje de nutrientes por cosecha de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus maidenii*. XIII Congreso Forestal Mundial.

HERNANDEZ, J. 2009. Nutrient export and harvest residue decomposition patterns of a *Eucalyptus dunnii* Maiden plantation in temperate climate of Uruguay. Forest Ecology and Management.

HERNANDEZ, J. 2010. Cuantificación de la extracción y reciclaje de nutrientes en eucalipto. Facultad de Agronomía. Universidad de la República.

VANCE. 2000. Soils and Environmental Quality, 2nd Edition, Lewis Publishers.

NOTA: Esta bibliografía corresponde exclusivamente a la referenciada en el presente Documento de Síntesis. Una relación completa de la bibliografía consultada se detalla en el Informe original.