



Instituto Nacional de  
Tecnología Agropecuaria



Ministerio de  
Agricultura, Ganadería y Pesca  
Presidencia de la Nación

Actualización Técnica N° 80    Diciembre 2013

# Tecnologías de henificación en residuo de cosecha de caña de azúcar



▪ Ediciones

Instituto Nacional de  
Tecnología Agropecuaria



## Tecnologías de henificación en residuo de cosecha de caña de azúcar

### Evaluación múltiple de megaenfardadora, enfardadora y rotoenfardadora de nueva generación

La caña de azúcar es uno de principales cultivos del norte de Argentina, ocupando en la última campaña 2013 una superficie de 357.000 ha. Luego de efectuada la cosecha mecánica de la caña quedan en superficie aproximadamente entre 15 y 25 toneladas/ha de RAC (residuos agrícolas de cosecha) que normalmente son incorporados al suelo, recolectados con máquinas henificadoras o destruidos mediante la quema. Esta última está totalmente prohibida en la Provincia de Tucumán por la ley 6.253 y su modificatoria, la 7.459. Estas leyes fueron reglamentadas por el Decreto Nº 795/3 MDP, el cual en su artículo primero prohíbe la quema y en su artículo treceavo, impone sanciones a quienes incumplan con el mismo.

Estas prácticas para disminuir la cantidad de RAC en superficie se deben a que este residuo dificulta las labores posteriores del cultivo, a su vez que aumenta los costos de manejo del cañaveral, generando año a año importantes efectos como:

- Dificulta el cultivo mecánico, la operación de fertilización y el control selectivo de malezas a través del colchón de residuo.
- Demora el brotado y genera discontinuidad del mismo, produciendo una disminución del rendimiento cuando las temperaturas son bajas y/o el suelo está muy húmedo luego de cosechar.
- Incrementa las poblaciones de plagas que se refugian y multiplican debajo del RAC.<sup>[1]</sup>

Según estudios, al quemar la caña se genera la pérdida del 48% del RAC, presentando una serie de inconvenientes como ser:

- Incremento de la necesidad de herbicidas
- Pérdida de nutrientes del suelo y afectaciones a los microorganismos

- Disminución de la porosidad del suelo y como consecuencia de esto menor infiltración del agua.
- Eliminación de los enemigos naturales de las plagas.<sup>[2]</sup>

Además de esto, produce contaminación ambiental por la emisión de gases como CO, NOx, N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>, generando como consecuencia, efectos adversos en la salud aumentando en gran medida las afecciones del aparato respiratorio como el asma, la neumonía y la bronquitis; problemas en la vista y daños a la vestimenta y suciedad en las ciudades cercanas.

Una alternativa sustentable de manejo agronómico, es recolectar este residuo de cosecha mediante máquinas henificadoras como rotoenfardadoras (generan rollos de entre 300 y 400 kg), megaenfardadoras (fardos gigantes de 280 y 320 kg) o picadoras con cabezal recolector pick up. Esta última, a diferencia de las dos primeras alternativas, produce un manejo del material a granel el cual no puede ser trasladado por grandes distancias ya que genera aproximadamente un 30% de ineficiencia de uso del espacio debido a la menor cantidad de kg trasladados por m<sup>3</sup> en el flete. En el caso de los rollos un camión puede trasladar hasta 30 unidades de 1,20 m de ancho y 54 megafardos de 0,80 m x 0,87m.

Luego de que se efectúa la cosecha mecanizada, el RAC queda esparcido en el campo hasta que su humedad disminuya a valores inferiores al 20%, momento en el cual se puede efectuar la henificación mediante rollos o megafardos. Es importante aclarar que, con niveles de humedad superiores, hay altos riesgos de que se produzcan fermentaciones que en casos extremos pueden llegar a causar el ardido del material henificado, además de no permitir una combustión adecuada en caso de utilizarlo para energía.- Generalmente, esta tarea se realiza entre los meses de mayo y octubre, por lo cual al ser este periodo seco, normalmente se logra alcanzar esta humedad en un lapso de 20 días.

Toda esta biomasa, que es quemada, podría ser apro-



Figura 1: henificación de Residuo Agrícola de Cosecha de Caña de Azúcar

vechada para la generación de energía como una alternativa renovable de producción de energía, diversificando así la matriz energética de las provincias del norte del país y reduciendo los problemas mencionados anteriormente. Además, este material puede presentar otros usos, como alimento fuente de fibra para ganado bovino de cría y de tambo.

A nivel internacional, numerosos países (Brasil, Cuba, Australia, etc.) ya vienen empleando el RAC como fuente de energía alternativa. En nuestro país ya existen casos de uso energético del RAC en las provincias de Jujuy y de Tucumán.

Un ejemplo es el Ingenio Ledesma, que en el año 2012 reemplazó 15 millones de m<sup>3</sup> de gas natural, lo que representa un 10% del gas que es consumido anualmente por la empresa.

Por otra parte, gracias al aprovechamiento de la fibra, hidroelectricidad de usinas hidroeléctricas y este proyecto de biomasa, hoy el 40% de la energía que usa Ledesma es renovable.<sup>[3]</sup>

### Evaluación múltiple de equipos de henificación en residuo de cosecha de caña de azúcar

**Debido a que esta técnica de henificación del RAC se está expandiendo en la zona cañera argentina, el módulo Tecnologías en Forrajes Conservados de alta calidad (Programa Nacional Agroindustria) del INTA, en convenio de asistencia técnica con AGCO Argentina S.A., realizó un ensayo para conocer las prestaciones de toda la línea de equipos de henificación. El ensayo fue realizado con maquinaria y lotes provistos por Servicios Agrícolas Los Laureles y colaboración de Agromecánica Calchin y Agrícola García.**

El objetivo de esta prueba fue conocer las prestaciones de una megaenfardadora Challenger LB33B, una rotoenfardadora Challenger RB46CA y una enfardadora Valtra Hesston 1837, para henificar residuo de cosecha de caña de azúcar (RAC), en similares condiciones de trabajo a campo.

Durante el ensayo se evaluaron las pérdidas de material a nivel de recolector en condiciones de ser henificado en los tres equipos, capacidad de trabajo, velocidad, consumo de combustible, densidad de los henos confeccionados bajo tres presiones de compactación distintas para cada una de las máquinas y la calidad de los rollos, megafardos y fardos obtenidos de cada tratamiento durante el ensayo.

### Materiales y métodos:

El ensayo fue llevado a cabo desde el 14 al 16 de Agosto de 2013 en la Provincia de Tucumán. En el mismo se realizó una evaluación múltiple sobre las prestaciones logradas por 3 equipos de henificación que conforman diferentes estructuras (rollo, megafardo y fardo) sobre residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar (RAC). Durante la prueba se henificaron un total de 70 km lineales de andana de RAC, conformando un total de 110 megafardos, 93 rollos y 109 fardos.

Los equipos fueron evaluados con 3 presiones de trabajo distintas; determinando para cada una de ellas: capacidad de trabajo, velocidad de llenado de cámara, consumo de combustible, densidad de los henos confeccionados y pérdidas de recolector (RAC no recogido).

Cada equipo, con cada presión, trabajó un total de 2.550 metros, dentro de los cuales se realizaron 3 repeticiones de 850 m cada uno, donde se tomaron todos los parámetros evaluados.

El lote sobre el cual se trabajó presentaba un RAC promedio de 24.000 kg/ha, con un máximo de 33.000 kg/ha en algunos ambientes y mínimos de 17.400 kg/ha en las zonas menos productivas. Este residuo pertenecía a la segunda cosecha (Soca 1), de una Caña variedad LCP 384 cuyo rendimiento cultural fue de 1.150 kg/surco equivalentes a 71.000 kg/ha. Es importante aclarar que la Caña de Azúcar se cultiva en bordos, que en este caso particular presentaban una altura promedio de 16 cm respecto al fondo del surco. El ancho del mismo era de 80 cm y la distancia entre centro de bordos de 1,6 m. El hilado del residuo se llevó a cabo con un rastrillo estelar de 4 estrellas (Figura 1), el cual, con un ancho de trabajo de 2,90 m, tiene la función de juntar el RAC acumulado en dos surcos, conformando una gavilla que queda situada sobre el bordo, por donde posteriormente recolectarán las máquinas henificadoras.

Durante el rastrillado se evaluó la eficiencia de recolección lograda tanto en el surco como en el bordo. Las muestras recolectadas en 10 estaciones de muestreo, arrojaron datos que en el espacio que queda entre las andanas permanecían sin recolectar por el rastrillo 630,6 gr/m<sup>2</sup> de RAC, que se traducen en 6,31 tn/ha. Considerando que las estimaciones de rendimiento del RAC que presentaba este lote fueron de 24 t/ha, la eficiencia de recolección del rastrillo estuvo en el orden de 73,7%.

La Megaenfardadora fue traccionada por un tractor Valtra BT 210 (215 HP), mientras que las otras dos henificadoras trabajaron con un tractor DeutzFahr AX 4.100 (110 HP).



Figura 2: andana conformada por el rastrillo estelar. Detalle del rastrillo con 4 estrellas.

### Evaluación de pérdidas:

Para la determinación de las pérdidas por recolector se marcó con estacas tres diferentes sectores (clausuras) de 3 m de largo por el ancho del recolector, en cada uno de los tratamientos, procediendo a juntar el material no captado por los recolectores al pasar la máquina, determinándose luego el porcentaje de material perdido.

Las andanas confeccionadas por el rastrillo presentaban un ancho que variaban regularmente entre 1,40 m y 1,60 m, con una altura promedio de 0,65 m. Estas andanas quedaban conformadas sobre los bordos, en los cuales también se encontraba tocones de caña que presentaban una altura de 10 a 15 cm (Figura 3), lo cual hizo que haya que trabajar en todas las máquinas con un despeje del recolector de hasta 10 cm, respecto al piso en la zona del bordo. Tener en cuenta que parte de la andana quedaba dispuesta sobre el surco, dado que el ancho de esta era mayor al ancho del bordo, lo cual dificultaba el trabajo de los recolectores.

La cantidad de material que presentaban las gavillas sobre las cuales trabajaron las 3 máquinas variaba entre 4,5 kg/m lineal, en las zonas menos productivas del lote, a 8 kg/m lineal en los ambientes con mayor cantidad de residuo de cosecha. Es importante recordar que para un correcto trabajo de las rotoenfardadoras lo aconsejable son valores cercanos a los 5-6 kg MS/m lineal().

Es importante destacar que esta prueba se llevó a cabo en un lote de producción, el cual no tenía como

objetivo recolectar la mayor cantidad de RAC posible, sino disminuir la cantidad de material dispuesto. Si se hubiese querido aumentar la agresividad del recolector se podría haber disminuido la altura del mismo y aumentar la eficiencia de las henificadoras. El objetivo de evaluación de este punto es conocer las prestaciones de las máquinas en lotes de producción configurada como la utilizan los usuarios normalmente.

### Otras determinaciones:

Para cada una de las 3 presiones de trabajo (110, 140 y 170 Bar) se evaluó:

- La capacidad de trabajo de los diferentes equipos, cronometrando el tiempo que demoró cada máquina en confeccionar una cantidad determinada de fardos, rollos y megafardos.
- El consumo de combustible, iniciando la tarea con el tanque lleno, se trabajó henificando una cantidad determinada de superficie durante la cual se contabilizaron, los fardos, rollos y megafardos realizados. Posteriormente se llenaron los tanques de los 3 tractores, determinándose la cantidad de gasoil consumido por cada equipo.
- La velocidad real de trabajo: para ello se cronometró el tiempo que demora cada equipo, -a ritmo normal de trabajo- en recolectar 200 m se; expresando el dato luego en km/h.
- Densidad de trabajo de cada máquina, se midieron 6 fardos, 6 rollos y 6 megafardos, para establecer una medida representativa para el cálculo del volumen. Utilizando una báscula se pesaron



Figura 3: (a) detalle de tucón de 15 cm de altura y (b) bordo de 80 cm de ancho

dichos henos identificados, obteniéndose el peso promedio de cada fardo, rollo y megafardo. Posteriormente, por fórmula se estableció la densidad de trabajo.

- Calidad del material confeccionado: con el fin de determinar la calidad de este material como fuente de fibra para alimentación vacuna, se tomaron muestras de 3 rollos y 3 megafardos, las cuales se enviaron a laboratorio para establecer materia seca (MS), fibra detergente ácido (FDA), fibra de detergente neutro (FDN) proteína bruta (PB) y Cenizas (Cz).

Los equipos de henificación utilizados se describen a continuación:

### ➤ Rotoenfardadora Challenger RB46CA:

Posee un recolector de 1,97 m, el cual es más ancho que la cámara de compactación (1,20 m), lo que facilita la carga lateral del forraje sobre los costados de la cámara aumentando la densidad lateral del rollo (Figura 6). El RAC de la andana que se recolecta es trasladado hacia los laterales de la cámara de compactación por dos sinfines ubicados a ambos lados del recolector.

El recolector de esta máquina es de tipo flotante y está compuesto por un eje con 4 barras porta dientes, 52 dientes dobles separados a 6,6 cm (controlados por un riel de levas), un protector antiviento y posee



Figura 4: Rotoenfardadora Challenger RB46CA:

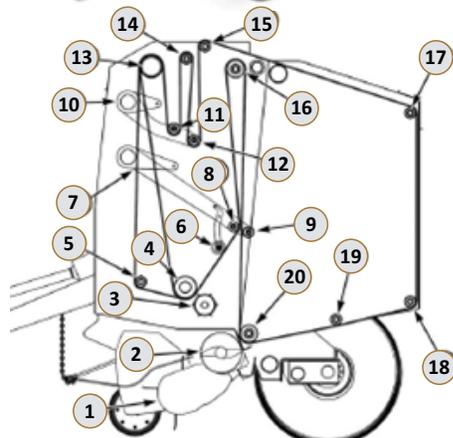


Figura 5: esquema de rotoenfardadora Challenger. Vista lateral izquierdo: (1) Conjunto del cabezal pickup (2) Sinfín y embudidor (3) Rodillo de inicio (4) Rodillo de mando inferior (5) Rodillo escalonado (6) Conjunto de rueda formadora del rollo (7) Brazo de densidad del rollo (8) Rodillo frontal de densidad del rollo (9) Rodillo trasero de densidad del rollo (10) Brazo de tensión de correa (11) Rodillo frontal de tensión de correa (12) Rodillo trasero de tensión de correa (13) Rodillo de mando superior (14) Rodillo intermediario frontal superior (15) Rodillo intermediario trasero superior (16) Rodillo superior de la cámara (17) Rodillo superior trasero de compuerta trasera (18) Rodillo inferior trasero de compuerta trasera (19) Rodillo intermediario inferior de compuerta trasera (20) Rodillo intermediario inferior delantero de compuerta trasera.



Figura 6: detalle de recolector Rotoenfardadora.



Figura 7: esquema de recolector Rotoenfardadora. Fuente: AGCO Argentina SA, (2011).

2 ruedas pivotantes de copiado, que facilitan la recolección al trabajar en terrenos desparejos como presenta la caña de azúcar. El sistema de elevación es hidráulico (Figura 7).

Se recomienda utilizar una altura de recolector de forma tal que la hilera de dientes inferior se encuentre a 2,5 cm por encima del suelo, colocando la rueda limitadora a 1,5 cm por encima del suelo. Debido al gran volumen de materia que se recolecta al trabajar con RAC, se aconseja colocar el protector antiviento elevado, de forma tal que no limite el ingreso de material (ver figura 8).



**Figura 8:** vista lateral de recolector. Detalle de protector antiviento. Fuente: AGCO Argentina SA, (2011).

Las ruedas limitadoras de altura de recolección no deben soportar todo el peso del recolector, dado que trabajan solidarias con los resortes de flotación para impedir que el recolector entre en contacto con la tierra. La tensión de los resortes de flotación del recolector viene regulada de fábrica, de forma tal que al aplicar entre 25-35 kg de presión en el centro de la rueda se levanta el recolector, evitando así que los dientes entren en contacto con el suelo (Figura 9).

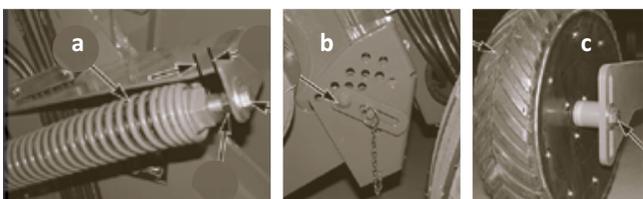
El material hilerado es ingresado a la máquina por el cabezal pickup. Detrás del recolector se ubican dos sinfines, uno del lado izquierdo y otro del lado derecho, que trasladan el material hacia la abertura de la cámara. En el mismo eje sobre el cual se montan estos sinfines, se disponen un rotor que tiene por función acelerar el flujo de material que ingresa por la abertura de la cámara (Figura 10). Este acelerador de forraje interno, tal como su nombre lo indica, acelera el material hacia el interior de la cámara de compactación, permitiendo un flujo de material más limpio y mayor velocidad de avance con menor riesgo de atas-

camientos, lo cual es muy importante en materiales muy voluminosos como el RAC. Este diseño es de tipo garganta abierta vertical, dado que el flujo de material captado por el recolector recorre una distancia muy corta hasta llegar a la cámara de compactación, donde el forraje toma contacto con la superficie rugosa de las correas formadoras del rollo, las cuales se desplazan hacia arriba y son conducidas por los rodillos de mando superior e inferior (Figura 10).

Una vez que el material ingresa a la cámara, la formación inicial del rollo (núcleo) es llevada a cabo contra un único rolo iniciador, continuando posteriormente el progreso de henificación con un conjunto de 6 correas. Estas son de filamentos de nylon y poliéster con reticulado romboidal (3 telas), presentan un ancho de 17,7 cm y están empalmadas con grampas de acero inoxidable.

Una particularidad destacable de esta máquina es que posee doble cilindro de prensado para la cámara en cada lateral. El sistema de prensado se realiza con dos cilindros hidráulicos que trabajan sobre los brazos controladores de densidad de rollos sobre los brazos tensores de correas, los cuales se regulan mediante una válvula reguladora de presión. Los cilindros hidráulicos llevan hacia abajo los brazos de densidad del rollo y los brazos de tensión de correa que actúan mediante una serie de rodillos dispuestos en los extremos de dichos brazos. Los rodillos de densidad del rollo son mantenidos hacia abajo para reducir el tamaño de la cámara en la confección del rollo. Los rodillos de tensión de correa también son mantenidos hacia abajo para suministrar tensión a las correas formadoras. En la medida que el rollo aumenta su tamaño, los rodillos de densidad y los rodillos de tensión de correa son forzados a subir, pero los primeros generan fuerza hacia abajo contra el rollo. Esta fuerza es la que ejerce presión sobre el rollo y comprime el RAC que ingresa a la cámara. Los rodillos de tensión de correa se van moviendo hacia arriba para mantener estiradas las correas formadoras a medida que se incrementa el tamaño del rollo en la cámara.

Los brazos de densidad del rollo poseen unos sensores denominados ruedas de montaje, los cuales indican el tamaño del rollo en la consola y que sirven pa-



**Figura 9:**a: resorte de flotación. b: regulación de altura del recolector. c: regulación de rueda limitadora de profundidad. Fuente: AGCO Argentina SA, (2011).



**Figura 10:** Rotor acelerador del forraje al interior de la cámara de compactación



**Figura 11:** Esquema que muestra el proceso de alimentación y formación del rollo. Fuente: AGCO Corporation, 2011.

ra guiar al operador en el llenado correcto de la cámara de compactación (Figura 11).

Posee un sistema hidráulico que controla el embrague de mando principal, el funcionamiento de la compuerta trasera, el sistema expulsor de rollo y que, a su vez, ejerce presión sobre las correas formadoras y sobre el rollo. La válvula de control principal está ubicada sobre el lado derecho de la máquina. El cabezal pickup y el sistema de compactación están protegidos de cualquier sobrecarga por un embrague de perno radial, el cual brinda protección a todos los componentes mecánicos cuando el límite de torque es alcanzado, patinando para detener la máquina (Figura 12).

El sistema de atado está compuesto por un brazo con doble alimentación de hilo, accionado eléctricamente y comandado electrónicamente desde el monitor. El brazo se encuentra ubicado en su punto muerto, al momento de iniciar el atado se dirige hacia el extremo derecho, y comienza el mismo hacia el extremo izquierdo. Según las vueltas de rollo programadas son las cantidades de ciclos que realiza el atador desde el extremo derecho al izquierdo. Cuando se completa el ciclo de atado, el hilo es cortado por una cuchilla.

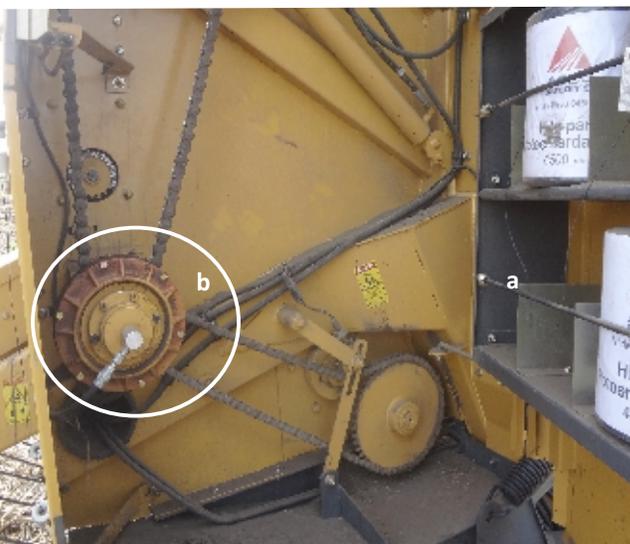
La regulación puede ser manual o automática. La velocidad de atado y la cantidad de hilo (número de

vuelta al rollo), es calibrable a través de actuador eléctrico. Cuando se modifica desde el monitor el paso o espaciamiento del hilo, resulta apropiado establecer la misma separación entre las agujas del atador. En cuanto al almacenamiento de hilo, en cada lateral cuenta con un compartimiento para la colocación de seis bobinas de hilos (plástico o sisal), acopiando un total de doce unidades.

El sistema de expulsión de rollo está compuesto por una barra de empuje y dos cilindros hidráulicos y este puede funcionar manualmente o automáticamente cuando la configuración de Auto expulsión es activada en la consola.

Luego que la compuerta trasera es completamente elevada, la presión hidráulica se aplica sobre el extremo base de los cilindros hidráulicos del expulsor. La barra de empuje del rollo se mueve hacia arriba y hacia abajo, manteniendo al rollo alejado de la compuerta mientras se cierra la misma.

Posee un monitor C 1000, el cual permite al operador visualizar desde la pantalla diversos parámetros, como tamaño del rollo (se muestra el tamaño actual del mismo), gráfico de barras que indica que lateral hay que llenar o si el rollo está completo, un contador de fardos instantáneo y otro total por lote, un icono de conducción/detención, vista lateral de la enfardadora (muestra la posición de la compuerta trasera y del eyector), ícono de descarga automática, ícono de atado, tamaño establecido del rollo, entre otros. A su vez permite realizar diversas configuraciones y programaciones (modo manual o automático) del sistema de atado, sistema de expulsión, etc (Figura 13).



**Figura 12:** a) compartimiento lateral con depósito de bobinas de hilo. b) Detalle del embrague de perno radial.



**Figura 13:** monitor C 1000



Figura 14: Megaenfardadora Challenger LB33B

Esta máquina requiere un tractor de 100 hp con una velocidad en la toma de potencia de 540 ó 1.000 rpm, con un peso mínimo de 2.721 kg

### ➤ Megaenfardadora Challenger LB33B

El RAC de la andana es recolectado por un cabezal pickup de 2.597 m y trasladado hacia los laterales de la cámara de compactación por dos sinfines, ubicados a ambos lados del recolector. Está compuesto por uneje, 4 barras porta dientes, 64 dientes dobles separados entre si a 6,6 cm y un protector antiviento. Es flotante y posee 2 ruedas pivotantes de copiado, lo que facilita la recolección al trabajar en terrenos desparejos como presenta la caña de azúcar. El sistema de elevación es hidráulico (Figura 16).

Se recomienda utilizar una altura de recolector similar a la recomendada para la rotoenfardadora. Al igual que en la rotoenfardadora, las ruedas limitadoras de profundidad no deben soportar todo el peso del recolector. La tensión de los resortes de flotación del recolector viene ajustada de fábrica, de forma tal que al aplicar 54 kg en el centro de la rueda se levanta el recolector, evitando así que los dientes entren en contacto con el suelo

Detrás del recolector se dispone un rotor alimenta-

dor de forraje, que tiene la función de acelerar el material hacia el interior de la precámara, disminuyendo los riesgos de atascamientos cuando se trabaja sobre gavillas elaboradas con alta humedad y que presenta el material en forma de bollos. Este rotor monta pares de estrellas de distribución helicoidal, que en las versiones con cutter hace pasar el material por las cuchillas semicirculares de zafe independiente dispuestas en el piso, originando un corte cizalla de la fibra de distintos tamaños de corte según la regulación.

Posteriormente el material es tomado por la horquilla de llenado que lo traslada desde la cámara de pre-compresión a la de empacado, y que sólo entra en funcionamiento cuando los dedos del sensor de activación indican que el material ha alcanzado la densidad necesaria. De este modo la densidad de los fardos es uniforme en todas las capas (panes).

Una vez que la capa ingresa a la cámara de enfardado recibe el trabajo de prensado del pistón. Este pistón de acero es conducido directamente desde la caja de transmisión principal que entrega 47 golpes por minutos con un largo de cursor de 740 mm.

El control de densidad, cuyos ajustes se realizan a través del monitor, mide la carga de los sensores del pistón. Cualquier variación, en la carga o en la densidad, activa el sistema de ajuste automático de presión hidráulica, que actúa sobre los laterales y la parte superior de la cámara, para que el megafardo logre la densidad deseada.



Figura 15: Esquema de organos internos de Megaenfardadora Challenger LB33B. Fuente: AGCO Argentina SA, 2011.

El sistema de atado cuenta con 4 hilos y utiliza doble nudo (Figura 18 a). En el anudador entran dos hilos, con los que se realiza el nudo final en el fardo terminado y el nudo inicial en el fardo en formación. Este sistema de doble nudo permite lograr megafardos con alta densidad, ya que la tensión que soportan los componentes del anudador y la cuerda, durante la formación del megafardo, es mínima.

Los anudadores están asistidos por ventiladores, que producen un flujo de aire que permiten mantenerlos limpios de la broza que se produce al enfardar.

El compartimento, donde se almacenan los hilos del sistema de atado, permite almacenar hasta 30 carreteles (Figura 18 b).

Estas máquinas cuentan con un sistema mecánico que indican la longitud que va tomando el megafardo, dato útil para activar los anudadores. Para esto cuenta con una rueda dentada que va midiendo los movimientos del megafardo dentro de la cámara de enfardado y que permite a su vez modificar la longitud del mismo. La rampa de descarga trabaja con rodillos, de los cuales los dos últimos están montados sobre rodamientos para amortiguar mejor la expulsión del megafardo.

Está equipada por un monitor GTA C1000, el cual muestra el funcionamiento de la megaenfardadora. En la pantalla de inicio indica información general como conteo histórico de megafardos, horas de trabajo, estado de registro de trabajo, tarea actual, conteo de megafardos de la tarea actual, etc. En otras pantallas se pueden regular diversos parámetros del sistema de compactación (capas por megafardos, presión en la cámara de compactación, modo de carga del pistón), del sistema de atado, del sistema de lubricación, etc. Posee un sistema de aviso por señales acústicas y visuales que advierten cualquier anomalía en la configuración de la máquina o cualquier falla que pudiese ocurrir en los sistemas durante el proceso de henificación (Figura 19).

Esta máquina requiere un tractor de 210 hp, que entregue una velocidad en la toma de potencia de 1000 rpm y posea un peso mínimo de 9.589 kg



Figura 16: detalle de recolector de Megaenfardadora.

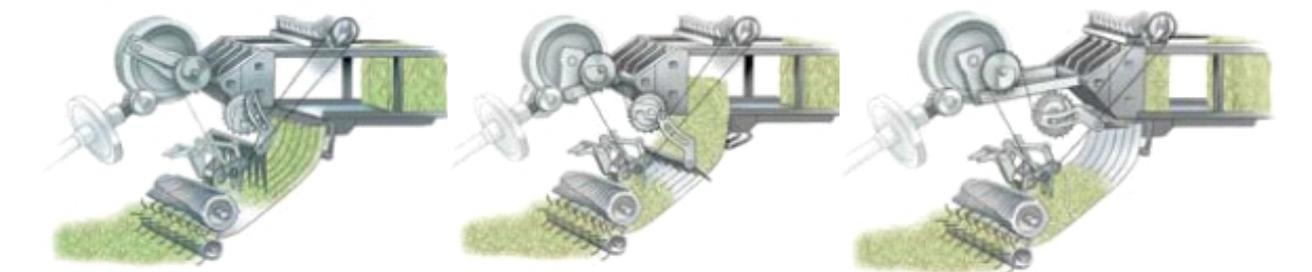


Figura 17: esquema de alimentación y formación de megafardo. AGCO Corporation, 2011.



Figura 18: a) detalle del sistema doble atador. b) almacenamiento de bovinas.



Figura 19: monitor GTA C1000.

### ➤ **Enfardadora Prismática Valtra Hesston 1837.**

Este modelo de enfardadora se destaca por poseer un sistema de carga central, en donde a medida que el material es recogido por el amplio recolector es dirigido en línea recta, sin cambios bruscos de dirección, a la cámara de pre-formado, donde es pre-comprimido en capas para luego ser comprimido por el pistón en la cámara de compactación (Figura 23). Esta particularidad de diseño permite utilizar este tipo de máquinas para enfardar un material voluminoso y seco como el RAC (Figura 21).

Un eje de mando vincula la toma de fuerza del tractor con la enfardadora y activa un embrague deslizante y un volante con perno de seguridad. El volante impulsa una caja de engranajes que moviliza el dispositivo de llenado, el pistón y el anudador.

El recolector posee un ancho 1,928 m y está diseñado con tres barras porta dientes que montan un total de 42 dientes dobles distanciados a 6,6 cm. Además posee dos sinfines de centrado, las ruedas limitadoras de profundidad y el resorte de flotación (Figura 23). La altura de los dientes sobre el suelo se fija ajustando la longitud del perno de tensión del soporte del resorte. Las ruedas limitadoras de profundidad protegen el recolector cuando se enfarda en terrenos que no están nivelados, como es el caso de la caña de azúcar.

El material que ingresa por el recolector es tomado por dos sinfines de centrado que lo mueven desde los extremos hacia el centro, donde es captado por las horquillas de llenado, las cuales poseen 4 garras que mueven el heno desde la cámara de carga a la cámara de compactación (Figura 22).

Luego el pistón comprime el heno contra el fardo que se formará en la cámara. Este trabaja a una velocidad de 100 rpm, realizando una

carrera de 550 mm (Figura 23). La cámara de compactación posee un tamaño de 356mm por 457 mm con un largo de enfardado que puede variar de 305 mm a 1.321 mm.

Posee un sistema atador de tipo mecánico con accionamiento automático. A medida que el heno comprimido pasa por la cámara de fardos, una rueda de dosificación gira y controla la longitud de los fardos. Cuando se alcanza la longitud determinada, el brazo de desplazamiento del anudador es levantado hasta el punto en el que el embrague se desconecta, permitiendo comenzar de esta forma el ciclo de atado.

La densidad y el peso del fardo son determinadas por la cantidad de resistencia que se ofrece al material cuando este pase a través de la cámara de compactación. Esta resistencia es determinada por la cantidad de tensión aplicada con los rieles de control de densidad y por el número de resistores (planchuelas) de heno utilizados.

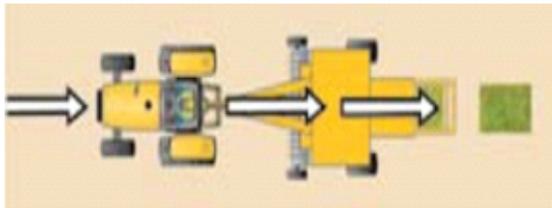
Los resistores laterales mejoran la distribución del heno en el fardo y en algunos casos pueden mejorar la densidad del fardo, a la vez que emparejan los laterales de los mismos. Si se instalan resistores adicionales en las puertas de las cámaras, se reduce la frecuencia de las extracciones de hilo en la máquina, cuando se trabaja en condiciones de alta densidad.

Para obtener fardos con densidad adicional, cuando se enfarda en condiciones de material muy seco, liso y flexible se recomienda ajustar las puertas de la cámara de compactación hacia adentro y colocar el juego adicional de resistores de heno que viene con el equipo estándar de la enfardadora.

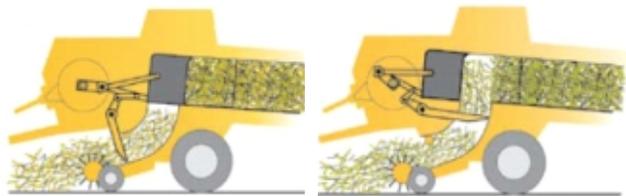
El control mecánico de la densidad se efectúa al girar las manijas. Hacia la derecha se aumenta la densidad de fardo y el peso de este, hacia la izquierda se gene-



Figura 20: Enfardadora Prismática Valtra Hesston 1837.



**Figura 21:** esquema de enfardadora con sistema de carga central. Fuente: AGCO Corporation, 2011.



**Figura 23:** esquema de recolección y formación de fardos. Fuente: AGCO Corporation, 2011.



**Figura 22:** detalle del recolector de enfardadora. El material es conducido al centro de la máquina.



ra el efecto contrario. Tener precaución, cuando se trabaje con materiales muy voluminosos como el RAC, donde una densidad de fardo muy alta puede romper el perno de seguridad.

El contador de fardos está montado debajo del brazo de desplazamiento del anudador, y aumenta en una cada vez que se conecta el brazo de desplazamiento del anudador. Esta máquina requiere una potencia mínima de 35 hp en toma de fuerza con una velocidad de toma de fuerza de 540 rpm, y un peso mínimo del tractor de 3.175 kg

## Resultados y Conclusiones:

### Pérdidas por recolector:

Las pérdidas ocurridas a nivel de recolector durante el trabajo de la Mega enfardadora Challenger LB33B fueron en promedio de 1,4 kg MS por cada metro li-

neal de andana. La Roto enfardadora Challenger RB46CA obtuvo valores de pérdidas que promediaron los 1,2 kg MS/ m lineal, mientras que con la enfardadora Valtra Hesston 1837 se dejaban de recolectar 1,9 kg MS/m lineal.

Estos datos expresados en porcentaje de material que no se recolectó por cada tonelada henificada, indican que la rotoenfardadora obtuvo una eficiencia de recolección del 71%, la megaenfardadora del 65% y la enfardadora pequeña del 55%.

Luego de la conformación de las andanas (rastrillado) y la recolección del material (máquinas henificadoras), el RAC remanente promedio de 12 estaciones de muestreo, fue de 10,8 tn/ha. Esto significa que se henificó el 55% del residuo total de caña (bordes y surco) que estaba disponible. Para un lote productivo se busca valores entre el 50 al 60%. En caso



**Figura 24:** vista trasera y lateral de enfardadora henificando RAC.



de querer aumentar este porcentaje de recolección debe aumentarse la agresividad del rastrillo pero se debe tener en cuenta que debe quedar una cobertura de residuo de cosecha en superficie, dado que en años normales llegan en los meses subsiguientes, elevadas precipitaciones.

*Las tres máquinas están equipadas con recolector de bajo perfil, con una distancia entre dientes de 6,6 cm y con un ancho de captación mayor que el de las cámaras de compactación. Si bien los recolectores de ambas máquinas son similares, la experiencia a campo desarrollada con los altos volúmenes de RAC en las gavillas confeccionadas (entre 6 y 8 kg/m lineal de andana), la rotoenfardadora trabajando a 3,5 Km/h. tuvo una eficiencia de recolección 6% superior respecto a la megaenfardadora que trabajó a 5 km/h.*

*En el caso de la enfardadora, la eficiencia de captación fue un 10% menor respecto de la megaenfardadora. Para lograr una mayor performance, la enfardadora necesita trabajar sobre gavillas con forma plana y no piramidal.*

### Capacidad de trabajo:

En la tabla 1 se resumen los datos y parámetros medidos para determinar la capacidad de trabajo de cada máquina.

Los registros de velocidad de avancen de la megaenfardadora fueron de 5 km/h cuando henificaba con una presión de 110 Bar, a 4,9 km/h cuando se la configuró con 140 Bar y a 4,8 km/h cuando enfardó con la máxima presión. La rotoenfardadora henificó a 5,1 km/h con una presión de 110 Bar, a 4,5 km/h cuando se la configuró con 140 Bar y a 4,7 km/h cuando enrolló a 170 Bar. La enfardadora trabajó a una velocidad media de 3 km/h.

La Megaenfardadora tuvo una capacidad de henificación superior al obtenido por la rotoenfardadora. Para efectuar el llenado de cámara ambas máquinas transitaron el lote a una velocidad cercana a los 5 km/h, pero la mayor capacidad de trabajo de la megaenfardadora se debe a la ausencia de detenciones para atar y expulsar el material henificado.

Durante la prueba la rotoenfardadora transitó el lote a una velocidad media de 5 km/h para producir el lle-

nado de su cámara, pero es importante aclarar que debió detenerse para realizar el atado y expulsión de cada uno de los rollos confeccionados. En esta prueba el tiempo promedio para producir el llenado de la cámara fue de 1,1 minuto/rollo (dependiendo del rendimiento del sector del lote donde transitaba), el atado lo hizo en 25 segundos y para su expulsión demoró 14 segundos.

*La Megaenfardadora logró una capacidad de henificación un 34,3% superior a la rotoenfardadora cuando se trabajó a 110 Bar de presión, un 38,72% cuando se trabajó a 140 Bar, y 34,74% cuando se trabajó con la máxima presión de compactación (170 Bar).*

*La rotoenfardadora logró su mayor capacidad de henificación cuando trabajó con 170 Bar debido a que la mayor compactación del material permitió incrementar el peso de cada uno de los rollos elaborados. Al trabajar con mayor presión se disminuyó la cantidad de unidades henificadas, con lo cual fueron menos las veces que la máquina estuvo detenida atando y expulsando rollos; manteniendo la velocidad de avance con la cual efectuó el llenado de cámara (3,5 km/h).*

*La megaenfardadora disminuyó la velocidad de avance a medida que se incrementaba la presión de compactación. Su capacidad de trabajo se incrementó cuando se pasó de 110 Bar a 140 Bar, dado que la velocidad cayó solo un 1,2% e incrementó en un 20% el peso henificado. Mientras que cuando se incrementaba de 140 a 170 Bar, la velocidad cayó un 3% y sólo se incrementó en un 5% el peso henificado.*

*La enfardadora puede trabajar a un 75% de la rotoenfardadora (110 Bar) y a un 48% de la megaenfardadora (110 Bar). La máxima presión en la cámara de compactación, para un correcto funcionamiento, se logró con una capacidad de trabajo de 8,25 tn MS/h de RAC.*

### Consumo de combustible:

En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en cuanto a consumo de combustible.

**NOTA:** La Megaenfardadora fue traccionada por un tractor Valtra BT 210 (215 HP), mientras que las otras dos henificadoras trabajaron con un tractor Deutz Fahr AX 4.100 (110 HP). En este sentido, cabe aclarar que en el comparativo entre la rotoenfardadora y la mega enfardadora, estamos tomando el dato de consumo de tractores de diferente marca, potencia y antigüedad, dado que cada implemento posee requerimientos diferentes, con lo cual este dato se debe tomar sólo a modo de referencia.



**Tabla 1:** Registro de distancia, tiempos y cantidad de henos elaborados por cada máquina. Capacidad de trabajo expresada en unidades elaboradas por minuto y en toneladas de MS por hora.

Máquina	Presión de Compactación (Bar)	Distancia (m)	Tiempo de trabajo (minutos)	Unidades henificadas	Peso de la unidad henificada	Tn MS/hora
Rotoenfardadora Challenger RB46CA	110	2.598	52,5	35	277	11,1
Rotoenfardadora Challenger RB46CA	140	2.532	55,2	32	320	11,7
Rotoenfardadora Challenger RB46CA	170	2.411	44,3	28	335	12,7
Megaenfardadora Challenger LB33B	110	2.579	31,1	38	231	16,9
Megaenfardadora Challenger LB33B	140	2.571	31,4	38	263	19,09
Megaenfardadora Challenger LB33B	170	2.586	32,5	37	285	19,46
Enfardadora Valtra Hesston 1837.	media	382	7,32	48	20 (19 – 20,5)	7,86
Enfardadora Valtra Hesston 1837.	máxima	390	8,32	52	22 (21 -23)	8,25

**Tabla 2:** Registro de consumo de combustible y materia seca henificada.

Máquina	Presión de Compactación (Bar)	Gas oil (litros)	MS henificada (kg)	Consumo Gas oil l/tn MS	Tiempo de trabajo (minutos)	Consumo Gas oil l/hora
Rotoenfardadora Challenger RB46CA	110	3,25	3.232	1,00	17,5	11,14
Rotoenfardadora Challenger RB46CA	140	3,33	3.413	0,97	18,4	10,85
Rotoenfardadora Challenger RB46CA	170	3,66	3.127	1,17	14,76	14,87
Megaenfardadora Challenger LB33B	110	3,56	2.926	1,21	10,36	20,61
Megaenfardadora Challenger LB33B	140	3,75	3.331	1,12	10,46	21,51
Megaenfardadora Challenger LB33B	170	4,46	3.515	1,26	10,83	24,70
Enfardadora Valtra Hesston 1837.	Intermedia	0,50	480	1,04	3,66	8,19
Enfardadora Valtra Hesston 1837.	Máxima	0,65	572	1,14	2,77	14,07

Respecto al consumo de combustible, para henificar una tonelada de Materia Seca, tanto la rotoenfardadora como la megaenfardadora fueron más eficientes cuando trabajaron con 140 Bar de presión.

En la megaenfardadora, a medida que se incrementó la presión en la cámara de compactación, se puede incrementar la cantidad de kg henificados totales que se tradujo en un aumento del consumo de combustible. A 140 Bar, la cantidad de RAC henificado fue de 400 kg superior a lo logrado con 110 Bar, con solo un incremento de 0,19 litros del consumo. Mientras que, a 170 Bar henificó 180 kg más de RAC, pero elevando el consumo a 0,7 litros.

La rotoenfardadora consumió a 140 Bar un 3% menos que cuando trabajó con 110 Bar. Esta diferencia se debe a que henificó 200 kg más de RAC (distinto rendimiento de ese sector del lote), sin que ello haya significado un aumento en el consumo de combustible. Cuando trabajó a 170 Bar, henificó 300 kg menos de RAC e incrementó un 17% el consumo de combustible, respecto del enrollado a 140 Bar.

La Megaenfardadora a 140 Bar, demandó un 7% me-

nos en litros/toneladas de combustible, que cuando trabajó a 110 Bar y un 11% menos que cuando trabajó con 170 Bar. Si comparamos ambas máquinas a 140 Bar, la rotoenfardadora consumió un 14% menos que la megaenfardadora.

El consumo de combustible de la enfardadora nos muestra que en todos los tratamientos demandó mayor cantidad de gasoil por tonelada henificada respecto de la roto y megaenfardadora.

La enfardadora, trabajando a máxima presión, para henificar una tonelada de MS, obtuvo parámetro de consumos similares al de la megaenfardadora trabajando con 140 Bar de presión y al de la rotoenfardadora trabajando a 170 Bar de presión.

#### Densidad de compactación:

En la tabla 3 se muestran los pesos obtenidos, el volumen y la densidad calculada de cada formato.

Analizando los parámetros obtenidos de la rotoenfardadora, ésta elevó un 12% la densidad al pasar de

Tabla 3: registro de medidas, volumen y peso de los henos elaborados.

Máquina	Presión de Compactación (Bar)	Medidas (m)	Volúmen (m <sup>3</sup> )	Peso Seco (kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Rotoenfardadora Challenger RB46CA	110	1,55 diámetro x 1,20 ancho	2,26	277	122,56
Rotoenfardadora Challenger RB46CA	140	1,57 diámetro x 1,20 ancho	2,32	320	137,93
Rotoenfardadora Challenger RB46CA	170	1,59 diámetro x 1,20 ancho	2,38	335	140,75
Megaenfardadora Challenger LB33B	110	2,27 largo x 0,87 ancho x 0,80 alto	1,58	231	146,20
Megaenfardadora Challenger LB33B	140	2,30 largo x 0,87 ancho x 0,80 alto	1,60	263	164,37
Megaenfardadora Challenger LB33B	170	2,30 largo x 0,87 ancho x 0,80 alto	1,60	285	178,12
Enfardadora Valtra Hesston 1837.	Intermedia	0,80 largo x 0,45 ancho x 0,40 alto	0,144	20	138,88
Enfardadora Valtra Hesston 1837.	Máxima	0,80 largo x 0,45 ancho x 0,40 alto	0,144	22	152,77

110 a 140 Bar, pero solo un 2% al pasar de 140 a 170 Bar. La megaenfardadora por su parte, también elevó un 12% la densidad al pasar de 110 a 140 Bar, y un 8% al pasar de 140 a 170 Bar.

La enfardadora, trabajando con máxima presión logró obtener valores de densidad 8% superiores al de la rotoenfardadora. Respecto a los megafardos, fue un 14% inferior cuando estos se elaboraron con 170 Bar, un 8% inferior a los megafardos realizados a 140 Bar, pero un 4% superior a los fardos gigantes confeccionados con 110 Bar.

*La megaenfardadora permitió henificar un 14% más de RAC por unidad de volumen que la rotoenfardadora, cuando se configuraron a 110 Bar, un 19% más cuando se trabajó a 140 Bar y un 26% más a 170 Bar. Esto indica que la megaenfardadora es más eficiente en cuanto a la cantidad de material henificado por unidad de volumen, permitiendo disminuir gastos de flete y cobertura.*

*Dado que el mayor incremento de densidad se logra pasando de 110 a 140, vs 140 a 170 Bar, se entiende que el mayor equilibrio entre la densidad lograda de RAC, consumo de combustible por tn y vida útil de los elementos móviles de las cámaras de compresión se logra a 140 Bar. A 110 las máquinas están subutilizadas y a 170 Bar sobreexigidas.*

### Alimentación de bovinos a partir del RAC (por Ing. Agr. Miriam Gallardo)

Los residuos agrícolas (RAC) son clásicos alimentos de tipo “voluminoso”, fuente esencialmente de fibra. En general poseen escaso valor energético y proteico: PB: < 8%; EM: <1.75 Mcal/ kg MS, debido a los elevados contenidos en fibra muy lignificada (FDN: +70%, + 12 % lignina en la MS de la fibra.), sobre todo porque la biomasa se trata principalmente de tallos, confiriendo a los materiales una muy baja digestibilidad, inferior al 45% de la MS. Además suelen estar contaminados con tierra y hongos.

El heno de residuos agrícolas de la Caña de Azúcar (RAC) no escapa a estas características. Su composición química y valor nutricional se muestra en la tabla 4.

Comparados a otros residuos forrajeros de cosecha (trigo, maíz, etc.), los RAC de Caña de Azúcar son un caso especial, porque la fibra del tallo está demasiado lignificada lo que hace prácticamente imposible que las bacterias ruminales la puedan utilizar de manera eficiente. Además, si está muy contaminado con tierra y hongos puede ser poco palatable y limita seriamente el consumo voluntario del animal. Si bien pueden quedar vestigios de azúcar de la caña, su valor es negligible.



Tabla 4: Composición química y características nutricionales de RAC (sobre muestras representativas tomadas “ad hoc”).

MS %	PB %	FDN %	FDA %	Dig%	EM (Mcal/ kg MS)	EN ganancia peso (Mcal/ kg MS)	Cz %
92,59	3,79	73,1	42,0	41,2	1,49	0,12	10,47

## ¿Cómo utilizarlos?

Estos recursos pueden suministrarse tal como cosechados (a granel) o bajo la forma de heno (rollos ó megafardos). En todos los casos, el suministro para el ganado de estar estrictamente controlado y, en lo posible, el forraje previamente trozado, ya que los accesos ad limitum y de material entero pueden perjudicar la calidad total de la dieta, generando "llenado ruminal" y consecuentemente: lenta tasa de pasaje y de digestión.

Representan recursos que pueden ser aptos para la alimentación de ganado de bajos requerimientos, como vacas de cría, por ej. Pero aún para estas categorías, si se utilizan como principal base forrajera diaria, se sugiere no utilizar más del 65% de la materia seca total a ser ingerida ya que, indefectiblemente, deberían ser suplementadas con fuentes adicionales de energía (almidón, melaza) y de proteínas (proteínas verdaderas y nitrógeno no proteico).

El vientre de cría podría "subsistir" con sólo este recurso, pero la pérdida de peso podría ser muy elevada y el Balance energético extremadamente negativo, comprometiendo severamente la función reproductiva de este ganado, sobre todo si se trata de vacas y vaquillonas de alta genética.

Además, si la dieta estuviera combinada con otros alimentos (pasturas, granos), sin control diario y estricto de suministros, este recurso terminará diluyendo el contenido en nutrientes o entorpeciendo la digestión de los demás ingredientes, sobre todo de los mayor calidad, como los más concentrados.

Sin embargo, en algunas situaciones coyunturales de manejo, podrían representar una buena fuente de FDN efectiva para otras categorías de ganado más exigentes (novillitos y novillos, vacas lecheras).

Se pueden utilizar con el objetivo de prevenir la acidosis con alto nivel de grano en las raciones, siempre y cuando el tamaño de la fibra de estos fibrosos sea el adecuado. Para acompañar dietas ricas en concentrados se recomienda suministrarlos trozados (2 a 5 cm), entre un 5 a 10% de la MS total, como máximo, dependiendo de los requerimientos nutricionales del ganado. La molienda fina, para mezclar con granos, no se recomienda, porque no mejora su utilización y simplemente acelera el tránsito de partículas por el tracto digestivo, ya que indefectiblemente la mayor proporción aparecerá en las fecas.

Los RAC de distintos cultivos pueden ordenarse, de mayor a menor, por calidad y valor nutritivo, de la siguiente forma: 1 )Avena, 2) Trigo-Cebada, 3) Arroz y Centeno, 4) Maíz,5) Sorgo, 6) Moha y Mijo, 7) Caña Azúcar (RAC) y Soja, 8) Girasol.

## Energía a partir del RAC

La energía producida a partir de la biomasa tiene junto con la hidráulica, un papel preponderante en muchos países. Los residuos que resultan de la actividad agrícola y forestal, constituyen un amplio porcentaje de la misma.<sup>[3]</sup>

Actualmente, muchos de los residuos que no son aprovechados, se constituyen en un problema medioambiental sin aprovechar el gran potencial de producción de energía a partir de los mismos, pero pueden tenerlo, siempre que se solucionen algunas dificultades como su mayor volumen o menor densidad energética, en comparación a los combustibles de origen fósil, necesitando, por lo tanto, una mayor desarrollo de logística en recolección, transporte y almacenamiento. Por medio de la compactación es factible aumentar la densidad de los residuos biomásicos, lo que facilita su manejo y permite su utilización como un combustible más homogéneo, solucionando el problema de los residuos y acondicionándolos para una posible utilización energética.<sup>[3]</sup>

Los factores que limitan la combustión óptima de las materias leñosas son esencialmente físicos: la densidad aparente, la granulometría y la humedad, además de su disponibilidad.<sup>[3]</sup>

Entre las biomásas, la caña de azúcar ocupa un destacado lugar por sus altos rendimientos agrícolas.

## Características del RAC

La caña de azúcar es uno de los cultivos con mayor capacidad de convertir la energía solar en biomasa. Si se toman en cuenta solo el bagazo y la paja, en los cañaverales se almacenan alrededor del equivalente a una tonelada de petróleo por cada tonelada de azúcar que puede producirse.<sup>[4]</sup>

La combustión de la biomasa no incrementa la concentración atmosférica de carbono, porque sólo devuelve a la atmósfera el carbono que fijó la planta durante su crecimiento.<sup>[4]</sup>

La biomasa aprovechable energéticamente son el bagazo y los RAC. El bagazo representa el 30% de los tallos verdes molidos y es el residuo fibroso de la molienda; se obtiene con un 50% de humedad. Según datos obtenidos del presente ensayo, se logró recolectar alrededor de 13000 Kg RAC/ha (24000 Kg RAC/ha de residuo inicial), dejando un porcentaje en el suelo para favorecer los procesos de mineralización de la materia orgánica, retención de humedad edáfica, evitar erosión, etc. Las características del RAC como combustible son las siguientes:

1. Composición química:<sup>[4]</sup> Carbono: 48,28%, Hidrógeno: 5,55%, Oxígeno: 45,61% ,Cenizas 9,5%, Azufre: 0,13% y Nitrógeno: 0,43%.

2. **Calor específico de combustión:** Según mediciones realizadas en la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), el poder calorífico inferior (PCI) del RAC con un 15% de humedad y entre un 10-11% de cenizas oscila entre 2300 y 2400 Kcal/Kg; llegando a poder calorífico superior (PCS) en promedio a 3500-3600 Kcal/kg (este valor tiene en cuenta la energía liberada por el vapor de agua al condensarse). Se lo utiliza en calderas especiales llamadas calderas de condensación. (Comunicación personal: Ing. Ind. Enrique A. Feijóo).

### Características energéticas y ambientales del uso de biomasa cañera

Para un valor calórico de 17476 MJ/Kg de materia seca, con un contenido de materia seca del 30% y un rendimiento de 100 toneladas de caña integral por hectárea, la producción energética de la caña es 20 veces mayor que la energía que se utiliza para producirla, cosecharla y trasladarla hasta el ingenio.<sup>[4]</sup>

Cuatro toneladas de RAC equivalen a una tonelada de petróleo (calor de combustión de la paja con 30% de humedad: 11,7 MJ/Kg.).<sup>[4]</sup>

El poder calorífico de maloja de caña de azúcar con 15% de humedad es de 3100 Kcal/Kg.<sup>[5]</sup>

### Usos energéticos del RAC

Existen en la actualidad diversos usos alternativos a la quema a campo abierto que se le pueden dar a estos residuos agrícolas de cosecha (RAC), entre ellos se encuentran algunos que se emplean a gran escala y donde la inversión por lo tanto es mayor, y otros de menor escala con menores inversiones para uso doméstico o en pequeñas producciones.

Entre los usos estudiados hasta el momento y los que aún se están evaluando se encuentran los siguientes:

- **Hidrólisis, para la producción de etanol lignocelulósico (2G):** La tecnología de conversión de biomasa lignocelulósica en azúcares fermentables para la producción de etanol viene siendo considerada como una alternativa promisoriosa para atender la demanda mundial de combustibles. A pesar de que ya existen tecnologías para el procesamiento de la celulosa, la mayoría tienen alguna dificultad técnica o económica. Si bien, en general se da esta situación, en algunos países como Estados Unidos existen empresas que ya se encuentran instalando plantas de producción de etanol a partir de residuos de cosecha de maíz y planifican procesar alrededor de 600000 mega fardos de los mismos al año.

La producción de etanol lignocelulósico requiere de las siguientes etapas: pre-tratamiento, hidrólisis y fermentación.<sup>[6]</sup>

- **Pirolisis:** consiste en la descomposición físico-química de la materia orgánica bajo la acción del calor y en ausencia de un medio oxidante (O<sub>2</sub>); es un proceso térmico de conversión en el que se utiliza un material con alto contenido de carbono para producir compuestos más densos y con mayor poder calorífico, que pueden ser empleados como combustibles directamente o luego de un tratamiento posterior. Los productos de la pirolisis son gases, líquidos y un residuo carbonoso, cuyas cantidades relativas dependen de las propiedades de la biomasa a tratar y de los parámetros de operación del equipo. En los últimos años la pirolisis se viene utilizando para la obtención de combustibles líquidos y productos químicos a partir del carbón y residuos orgánicos.<sup>[7]</sup>

- **Gasificación, para generación de energía eléctrica y diversos productos químicos:** es un conjunto de reacciones termoquímicas, que se produce en un ambiente pobre en oxígeno (combustión incompleta) a altas temperaturas (600-1500 °C), y que da como resultado la transformación de un sólido en una serie de gases posibles de ser utilizados en una caldera, en una turbina o en un motor, tras su debido acondicionamiento.<sup>[8]</sup>

- **Combustión, para generación de energía eléctrica o calor:** es el proceso de conversión en el cual se produce la oxidación completa del combustible. La combustión directa de la biomasa es el sistema más elemental y, por supuesto, más antiguo de recuperación energética de la misma. La energía obtenida en forma de calor (producto primario del proceso) se utiliza en calderas para la producción de vapor y como calor de proceso en una multitud de aplicaciones, como son las utilizadas para uso doméstico o industrial, calefacción, etc.<sup>[9]</sup>

### Estados Unidos: más bioenergía y más maíz sobre maíz

La matriz estadounidense es un modelo a seguir en desarrollo tecnológico agropecuario y agroalimentario, dado que invierte mucho dinero en investigación básica y hoy está indagando nuevos métodos para mejorar la eficiencia del maíz en su rendimiento bioenergético. Dentro de esa línea están buscando extraer etanol, no sólo del grano, sino también del mazo, la chala y del tercio superior del tallo de arriba, es decir etanol celulósico y lignocelulósico de segunda generación. Para lograr esto las cosechadoras tra-

bajan acopladas a una megaenfardadora prismática que entrega fardos de 500 kilos aproximadamente, que luego proveen 130 litros de etanol cada uno, según especialistas de la Universidad de Iowa.

Con este sistema, de un maíz de 100 quintales se extraerá del grano más o menos 4.000 litros de etanol, 3.000 kilos de DDGS y unas 2,5 t/ha de residuos (marlo, chala y parte del tallo) que aportarán 650 litros de etanol más por hectárea.

La Universidad de Iowa está trabajando desde hace varios años junto a empresas como Pioneer, Dupont y Agco en la producción de etanol de segunda generación a partir de megafardos de chala de maíz. Este Proyecto ha desarrollado una cosechadora experimental, la cual posee un cabezal maicero especial que corta la planta en el nudo inferior al que insertó la espiga. Este proceso hace que por la cola y el triturador salga marlo, chala y parte del tallo los cuales son dirigidos a un embudo que lo introduce en una megaenfardadora prismática, la cual va enganchada detrás de la cosechadora. Esta máquina confecciona megafardos de 500 kg de residuos de cosecha del maíz.

Estos sistemas se adaptan a Estados Unidos dado que está pensados para lotes de secuencia maíz sobre maíz, donde la biomasa sobra y no se compromete la sustentabilidad. En Estados Unidos ya hay 7 M/ha de maíz/maíz y se considera que está área se va a expandir.

### Farm Progress Show 2013: Innovaciones en maquinaria para recolección de biomasa

En mecanización para bioenergía celulósica o etanol celulósico AGCO presentó recientemente en Estados Unidos el modelo Hesston XD para fardos extras densos, tanto de heno como de biomasa. Es una máquina creada para henificar fardos extremadamente densos de 91 cm (3 pies) por 122 cm (4 pies), incluso con cultivos difíciles, sucios o mojados. La cámara de compactación posee longitud extendida Opti - Form

de 40,54 cm (16 pulgadas) de largo. Con este modelo se producen megafardos que son 15% más densos que los del modelo estándar, logrando de esta forma mayor eficiencia para apilar, cargar, transportar y almacenar los volúmenes de biomasa recolectados. Esta máquina posee modificaciones como cilindros tensores hidráulicos más grandes, así como los brazos del émbolo, volante, caja de cambios y la línea de conducción más pesados que le permiten lograr una mayor durabilidad al trabajar con materiales como tallos de maíz, paja de trigo y otros cultivos energéticos como miscanthus, switchgrass, etc.

En Estados Unidos, este modelo XD de Hesston es líder en la producción de megafardos de alta densidad necesarios para entregar un suministro constante de materiales como rastrojo de maíz, paja de trigo o miscanthus a las instalaciones donde se produce bioenergía o biocombustibles de segunda generación como el etanol en base a biomasa lignocelulósica.

En una serie de megafardos dispuestos en el stand de AGCO se mostraban los diferentes usos que puede tener este residuo de cosecha en diferentes procesos bioenergéticos. Además se hacía mención de una reciente investigación realizada en la Universidad de Iowa, sobre la obtención de un 5 a 7% más de rendimiento en la rotación maíz sobre maíz (cada vez más común en EEUU) al recolectar una parte de los residuos de cosecha del maíz anterior.

### Bioetanol de segunda generación en base a residuos de rastrojo de maíz

A nivel experimental, en diferentes centros de investigación y universidades en relación con el sector privado ya hace varios años que se viene trabajando en el desarrollo del bioetanol de segunda generación o en base a biomasa lignocelulósica. Las enzimas necesarias para la degradación de la lignina, para la liberación de los azúcares simples, que luego van a fermentar a etanol, ya están desarrollados, pero se está trabajando fuertemente en el desarrollo de la forma



**Figura 25:** Cosechadora con cabezal maicero especial que corta la planta desde el 8<sup>o</sup> nudo hacia arriba y que trabajan en tándem con una megaenfardadora provista de motor propio y que henifica el material no grano que sale por la cola de la cosechadora (marlo, chala y un tercio de los tallos)



Figura 26: Fardos de chala, marlo y tallo de maíz listos para etanol celulósico.

de producción que permitiera la realización de las mismas a menor costo, para hacer rentable la producción a escala comercial.

Por esto Dupont y Pionner va a estar inaugurando, para mediados del 2014, en el estado de Iowa una planta de producción de bioetanol en base a parte del material ligninocelulósico de los residuos del rastrojo del maíz.

En la Figura 28 se muestra una infografía presentada por Dupont/Pionner de las cifras de la planta de producción de bioetanol celulósico que esta empresa está instalando en el Estado de Iowa e inaugurará en el año 2014:

- Producción de 30 millones de galones/año que son unos 113,5 M de litros/año.
- Para los rendimientos de Iowa, con el rastrojo de maíz (hojas y tallo) que se recolecta van a producir unos 150 galones/acre, o sea unos 1400 litros/ha.
- La planta se va a proveer de megafardos traídos de campos, de un radio de 30 millas, o sea unos 50 km. Aproximadamente un 23% de la superficie de la producción de ese radio de 50 km.
- Si se recolectan unas 2 t/acre de residuos de maíz o sea unas 4,9 t/ha, se estima que la planta se va a utilizar los residuos de unos 375.000 t/año que saldrían de unos 190.000 acres o 76.000 ha.
- Por lo tanto la planta va a procesar unos 590.000 megafardos de residuos de cosecha de maíz por año, para producir bioetanol de segunda generación. (Dupont, 2013)

En la infografía también se observa que, para este proyecto de Dupont/Pionner, el rendimiento de etanol por tonelada de rastrojo es mayor y se estima extraer cerca del doble de residuos de cosecha por hectárea, de lo que comentaron los especialistas de la universidad de IOWA, teniendo una visión más conservadora del recurso suelo desde la universidad. Como comentamos anteriormente en relación a esta información, un trabajo de la Universidad de Minnesota realizado en el 2010 calcula para un rendimiento de

un maíz de 95 a 100 qq/ha, una producción de bioetanol con el rastrojo de maíz de aproximadamente unos 1.450 litros/ha (160 galones/acre – 1 Galón/acre = 9,37 litros/ha) (Mncorn, 2013).

Otro proyecto similar al de Dupont y Pionner en el Estado de Iowa, es el proyecto LIBERTY, que va a producir también bioetanol de segunda generación con los rastrojos del residuo de maíz, que es un Joint Venture entre dos empresas que son POET y DSM Advanced Biofuels. Este proyecto de DSM Advanced biofuels y POET será una de las primeras plantas de este tipo en los EEUU, ya que comenzará su producción a principios del 2014. Al igual que en proyecto de Dupont, se usarán megafardos de rastrojo de maíz (compuesto de mazorcas de maíz, chalas, hojas y tallos) para producir 20 millones de litros de bioetanol celulósico al año, para ir aumentando paulatinamente hasta los 25 millones de galones o 95 millones de litros al año. Sobre POET-DSM Advanced Biofuels, (LLC POET-DSM Advanced Biofuels), es una empresa conjunta entre Royal DSM y POET. Con sede en Sioux Falls, Dakota del Sur, la compañía es un esfuerzo cooperativo de dos innovadores que ofrecen una llave para abrir la posibilidad de convertir los residuos de los cultivos de maíz en bioetanol celulósico. Basado en los puntos fuertes de ambas compañías, la empresa conjunta tiene una misión fundamental: hacer bioetanol celulósico competitivo con el del maíz, el combustible de transporte líquido renovable más competitivo en el mercado de los EE.UU. en la actualidad. Aprovechando la amplia experiencia del POET y DSM en diferentes áreas de la conversión de biomasa celulósica en bioetanol, POET - DSM Advanced Biofuels tendrá su primera planta a escala comercial con biorrefinación en Emmetsburg, Iowa.

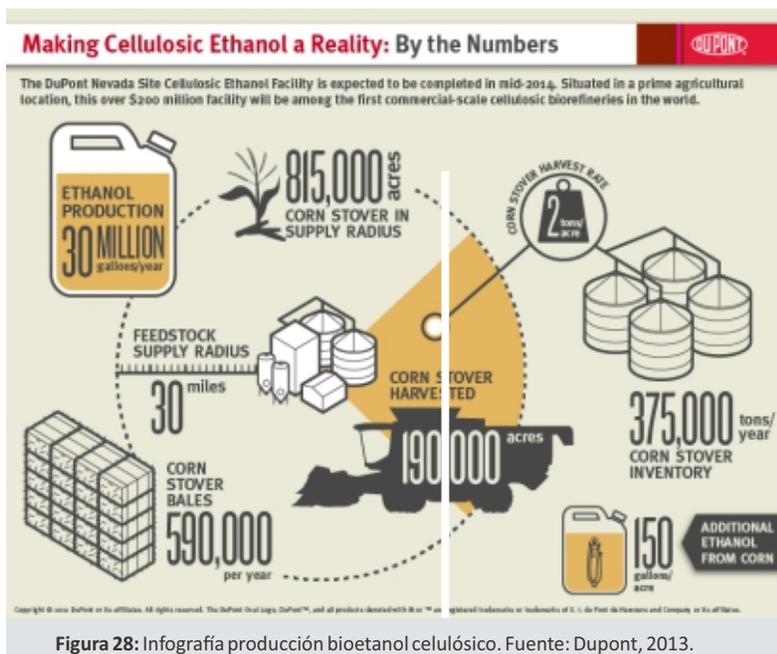


Figura 28: Infografía producción bioetanol celulósico. Fuente: Dupont, 2013.

En base a esta planta, la empresa planea licenciar globalmente un paquete tecnológico integrado para la conversión de los residuos del cultivo de maíz u otras producciones de biomasa para bioetanol celulósico. (Poetdsm, 2013)

#### Bibliografía:

- AGCO Argentina SA. (2011). Manual del operador rotoenfardadoras RB46/RB46CA RB56/RB56CA. Publicaciones técnicas AGCO Argentina SA. Buenos Aires, Argentina.
- AGCO Argentina SA. (2011). Manual del operador enfardadoras prismáticas gigantes LB23B / LB23BCE / LB33B / LB33BCE / LB24B / LB24BCE / LB34B / LB34BCE / LB44B / LB44BCE. Publicaciones técnicas AGCO Argentina SA. Buenos Aires, Argentina.
- AGCO Argentina SA. (2007). Manual del operador enfardadora prismática SB34/SB36 Publicaciones técnicas AGCO Argentina SA. Buenos Aires, Argentina.
- AGCO Corporation. (2011). Challenger Product guide v2 2011. AGCO Corporation. River Green Parkway, USA.
- Bragachini, M.; Cattani, P; Gallardo, M; Peiretti, J. (2008). Forrajes conservados de alta calidad y aspectos relacionados al manejo nutricional. EEA Manfredi.
- Bragachini, M; Peiretti, J. Sánchez, F. (2013). Nuevas tecnologías de Henificación: Megaenfardadoras. INTA EEA Manfredi.
- Gagiotti, M. (2008). Tabla de Composición Química de Alimentos para Rumiantes. INTA EEA Rafaela.
- [1] Suleiman, J, Lima Verde Real, M, Macedo, I (2005). Biomass power generation - Sugar cane bagasse and trash. Piracicaba, Brazil: PNUD.
- [2] Valdés Delgado, A. Los residuos agrícolas de la cosecha cañera (RAC). Centro Gerencia Programa y Proyectos Priorizados- Ministerio Ciencia Tecnología y Medio Ambiente Cuba.
- [3] Beltrán, P.F, Martínez, J.B.C, Veja, J.R.F, Acea, I.F, Medina, A.S y Mancio, V. (2011) Los residuos agrícolas y cañeros como alternativa energética del presente y del futuro.
- [4] Reyes Montiel, J.L, Perez Bermúdez, R, Betancourt Mena, J. Uso de la biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental.

- [5] Azevedo Fagundes, S, Pierossi, M, Bastos, M. Biomassa da palha de cana- CTC. New Holland
- [6] Santos, F.A, de Queiróz, J.H, Colodette, J.L, Fernández, S.A, Guimerães, V.M y Rezende, S.T. Potencial da palha de cana de açúcar para produção de etanol.
- [7] Castillo, E.F. Potencial del proceso de pirolisis como alternativa para la valorización de los residuos de cosecha en el sector azucarero colombiano.
- [8] IDAE (2007). Biomasa: gasificación.
- [9] Juana Sardón, J.M, (2003). Energías renovables para el desarrollo. Madrid, España: Paraninfo SA.

<http://biofuels.dupont.com/cellulosic-ethanol/nevada-site-ce-facility/>  
<http://biofuels.dupont.com/cellulosic-ethanol/feedstock/corn-stover/>

[http://www.mncorn.org/sites/mncorn.org/files/research/final-reports/201211/B6-CornStoverEthanolProduction\\_2.pdf](http://www.mncorn.org/sites/mncorn.org/files/research/final-reports/201211/B6-CornStoverEthanolProduction_2.pdf)  
[www.poetdsm.com](http://www.poetdsm.com)

#### Autores y participantes del ensayo:

- Ing. Agr. M. Sc. **Mario Bragachini** (INTA Manfredi)
  - Ing. Agr. **Federico Sánchez** (INTA Manfredi)
  - Ing. Agr. **Diego Mathier** (INTA Manfredi)
  - Ing. Agr. **José Peiretti** (INTA Manfredi)
  - Ing. Agr. **Diego Villarroel** (INTA Manfredi)
  - Ing. Agr. **Marcos Bragachini** (INTA Manfredi)
  - Ing. Agr. **Matías Alladio** (INTA Justiniano Posse)
  - Julio Iñón Díaz** (Agco Argentina S.A.)
  - Pablo Gallo** (Agromecánica Calchín S.H.)
  - Ing. Agr. **Adolfo Torres Bugeau** (Los Laureles Serv. Agríc.)
  - Sebastián Ramos** (Agrícola García)
  - Ing. Agr. **Juan Giordano** (INTA Rafaela)
  - Ing. Agr. **Luis Viccini** (INTA Famailla)
  - Ing. Agr. **Pablo Saleme** (INTA Famailla)
  - Ing. Agr. **Ricardo Rodríguez** (INTA Famailla)
  - Ing. Agr. **Miriam Gallardo**
  - Santiago Abrate** (Fac. Cs. Agroprecurias UNC)
- Comunicación:  
**Tec. Mauro Bianco Gaido** (INTA Manfredi)

