

V

APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS

Prof. Dr. LUIS JIMÉNEZ ALCAIDE
*Catedrático de Ingeniería Química,
Universidad de Córdoba*

APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS

LUIS JIMÉNEZ ALCAIDE

Los residuos agrícolas son muy abundantes en España y particularmente en la Comunidad Autónoma Andaluza. Se estima que la producción de los residuos agrícolas más importantes, por su abundancia, como son la paja de cereales, los tallos de girasol, los sarmientos de vid, los tallos de algodón y las podas de olivo, representan una cifra superior a los 20 millones de t/año, contribuyendo Andalucía con más del 30%.

Los principales constituyentes de los residuos agrícolas son la celulosa y la lignina, que suponen el 85-90% de los materiales secos, distribuyéndose el resto entre grasas, ceras, cenizas, azúcares simples, almidón, aceites esenciales, pectinas, gomas, taninos, etc.

Al conjunto de la celulosa se le denomina holocelulosa, distinguiéndose tres fracciones: α -celulosa, β -celulosa y Υ -celulosa.

La α -celulosa, celulosa noble o celulosa propiamente dicha, es un polímero cuyas unidades fundamentales están constituidas por grupos piránicos de la glucosa (anhídridos de β -glucosa) unidos entre sí, con variaciones alternativas, por enlaces 1,4- β -glucósidos, con formación de restos de celobiosa. El grado de polimerización está entre 1.000 y 5.000. Esta α -celulosa, por su carácter macromolecular constituye el tejido de sostén de los vegetales, es decir las fibras resistentes que los mantienen erguidos.

La β -celulosa es análoga a la α -celulosa en su constitución, pero con una estructura muy degradada, menor peso molecular y con fibras más cortas y desordenadas, lo que determina su mayor solubilidad en los reactivos químicos.

La Υ -celulosa es una pentosana constituida por restos de β -xilopiranos, con una estructura similar a la de la α -celulosa pero con un grupo -H en lugar del -CH₂OH. Dado que su grado de polimerización es bajo, del orden de 150, no forma fibras, se hincha y dispersa en agua fácilmente y se hidroliza con ácidos diluidos dando hexosas y pentosas, principalmente manosa, galactosa, xilosa y arabinosa.

La hemicelulosa (conjunto de β -celulosa y γ -celulosa) está acompañada generalmente por poliurónidos (productos de polimerización de ácidos urónicos y de sus derivados metilados). Estos productos se encuentran muy unidos a la lignina, por lo que resulta casi imposible separar la lignina sin perder buena parte de la hemicelulosa.

La lignina está constituida por unidades formadas por un grupo propilo unido a grupos guayacohilo, piperonilo y siringilo. Los radicales propilos pueden ser de diversos tipos, por lo que el número de moléculas diferentes de lignina puede ser muy elevado. Las unidades fundamentales de lignina se encuentran unidas entre sí formando macromoléculas de estructura compleja, con un peso molecular del orden de 850.

Los residuos agrícolas han de eliminarse por diversas razones, como contaminación, plagas, entorpecimiento del cultivo de los suelos, ocupación de grandes espacios, etc. Por ello se ha de proceder a un tratamiento de eliminación. Este tratamiento puede tener dos vertientes: una encaminada a la simple eliminación sin más, y otra a la eliminación con aprovechamiento de sus componentes o de su energía potencial química. Como es lógico, se ha de ir siempre a la segunda opción, pues en el peor de los casos se reducen los costes de eliminación, e incluso a veces pueden obtenerse beneficios.

El aprovechamiento de los residuos agrícolas puede realizarse de dos maneras generales: separando sus componentes para usarlos por separado, o transformándolos sin una separación previa.

La principal vía de aprovechamiento mediante separación de los componentes consiste en aislar las fibras celulósicas para la fabricación de papel. También pueden separarse otros constituyentes, como azúcares, almidón, etc., pero tienen mucha menos importancia económica.

En cuanto al aprovechamiento de los residuos agrícolas mediante transformación de sus componentes sin separación previa de los mismos, existen varias rutas de aprovechamiento, como se describe a continuación.

En primer lugar, tras la recogida de los residuos agrícolas, éstos han de someterse a una serie de operaciones físicas (reducción de tamaño, clasificación, secado, aglomeración, etc.), que tienen por finalidad acondicionarlos para los procesos de aprovechamiento posteriores. Estos residuos agrícolas acondicionados puede denominarse genéricamente material lignocelulósico.

Este material puede someterse a procesos físico-químicos o bioquímicos. Los primeros, denominados también térmicos o por vía seca, se caracterizan por desarrollarse a elevadas temperaturas, necesitar equipos sofisticados y tiempos de proceso cortos. En cambio, los procesos bioquímicos o por vía

húmeda requieren temperaturas bajas, equipos sencillos y tiempos de proceso largos.

Entre los procesos físico-químicos se consideran los de combustión, gasificación, pirólisis y licuefacción, y entre los bioquímicos los de producción de bioalcohol, biogas y proteína unicelular. En lo que sigue se consideran brevemente cada uno de ellos, junto al de producción de papel.

La fabricación de papel implica dos etapas: obtención de pasta y formación de las hojas de papel. La primera consiste en la transformación de los residuos agrícolas en fibras celulósicas aisladas en una suspensión acuosa. En la segunda, la pasta convenientemente tratada para desarrollar algunas propiedades características, se somete a operaciones que tienen por finalidad extenderla en forma de láminas y eliminar la mayor parte de su humedad.

Las principales operaciones que se realizan durante la etapa de fabricación de pasta son: Almacenamiento, descortezado y/o desmedulado, depuración o limpieza de la materia prima, reducción de tamaño, cocción o digestión, depuración del material cocido, refinado y blanqueo.

El almacenamiento es obligado, pues los residuos agrícolas se recolectan en períodos muy breves y han de procesarse después durante todo el año. Para el adecuado almacenamiento, la humedad relativa no ha de ser superior a 50-60%.

La operación de descortezado y/o desmedulado es necesaria para algunos residuos agrícolas (podas de olivo, tallos de girasol, etc.), pues la corteza y la médula consumen reactivos químicos en la cocción posterior y aportan impurezas a las pastas.

La depuración de la materia prima consiste en la eliminación de materiales extraños (alambres, cuerdas, arena, semillas, plásticos, polvo, etc.) mediante trampas magnéticas, arrastre neumático, cribas, etc.

La reducción de tamaño consiste en la formación de astillas o copos, mediante molinos cuya principal misión es la de disgregar los haces de fibras, de forma que se acorten y presionen lo menos posible.

La cocción tiene por finalidad eliminar parte de la lignina, que actúa de cemento de unión de las fibras, para que puedan separarse de forma individual. En la cocción se utilizan reactivos químicos como hidróxido sódico, sulfato sódico y sulfito sódico, obteniéndose pastas de mayor o menor rendimiento según la naturaleza de los residuos agrícolas, la concentración de reactivos y el tiempo y la temperatura de cocción. Las pastas de mayor rendimiento contienen bastante lignina, denominándose semiquímicas. Las de bajo rendimiento contienen poca lignina y se denominan químicas. A parte de éstas, existen otras pastas con un mayor rendimiento, llamadas mecánicas, en las que no se ha

eliminado prácticamente la lignina. Se obtienen mediante tratamientos físicos en molinos o refinadores de discos que tienen la misión de disgregar los haces de fibras; estas pastas no necesitan tratamientos químicos, en todo caso sólo un tratamiento con vapor de agua o con reactivos químicos diluidos, para conseguir el reblandecimiento de la lignina, pero no su eliminación.

La depuración de los materiales cocidos consiste en la eliminación de inocidos e impurezas pesadas y voluminosas, mediante depuradores dinámicos como centrífugas y ciclones o mediante cribas y tamices.

La operación de refinado es una de las más importantes. Consiste en un tratamiento en húmedo, en refinadores de discos o cónicos, que modifica la morfología y estructura físico-química de las fibras: se rompen las paredes primarias y secundarias, penetrando agua en su interior y produciendo hinchazón y fibrilación (fibrillas laterales) y aumentando su superficie y volumen específicos. Según se proceda en el refinado, de una misma materia prima pueden obtenerse papeles tan distintos como el papel de filtro (no refinado) y el papel vegetal (muy refinado).

La operación de blanqueo tiene por objeto obtener una pasta blanca y estable a un precio razonable y cuyas propiedades físicas hayan sufrido alteraciones mínimas. Consiste en la transformación de los grupos cromóforos de los componentes absorbentes de luz (lignina y resinas) o en la eliminación de dichos componentes. En las pastas mecánicas y semiquímicas de alto rendimiento, para no bajar el rendimiento, interesa la transformación química de los grupos cromóforos; ello se consigue con una simple etapa con peróxidos o hidrosulfitos. En las pastas químicas, que requieren mayor blancura, se ha de eliminar la lignina; se consigue mediante secuencias de blanqueo con más de una etapa. Generalmente se comienza con una etapa de que degrada la lignina, una segunda etapa de extracción alcalina, que disuelve los productos de degradación de la etapa anterior, y una tercera etapa oxidativa, que consigue la blancura final deseada; a veces se necesita más de una etapa oxidativa, con extracciones alcalinas intermedias. Para evitar el uso de cloro, que da lugar a lejías muy contaminantes, se han introducido etapas que utilizan peróxidos, oxígeno y ozono.

Los procesos de obtención de pastas a partir de materiales no madereros, como los residuos agrícolas, más importantes son los de Celdecor-Pomilio, Pandia y SAICA.

La etapa de fabricación de hojas de papel implica varias operaciones: Operaciones en el circuito de cabeza de máquina, caja de entrada, unidad de formación, prensa, sequería, operaciones de modificación del papel y bobinadora.

En el circuito de cabeza de máquina existen una serie de equipos destinados a conseguir, a la entrada del formador de hojas, de un flujo regular de pasta, con un caudal, consistencia y proporciones constantes, así como limpio de impurezas.

La caja de entrada es un elemento que tiene las misiones de transformar el flujo de pasta en rectangular, coincidente con el ancho de la máquina de papel, repartir homogéneamente ese flujo evitando floculaciones, e imprimirle una velocidad adecuada y constante.

La formación de la hoja de papel consiste básicamente en una filtración. El chorro de pasta se deposita sobre una tela, con una luz de maya del orden de la longitud de las fibras, y mediante una diferencia de presión aplicada a su través se consigue que la pasta pase de una sequedad del 2-3% al 20%.

La hoja de papel así formada se somete a un prensado en cilindros recubiertos de fieltro, para aumentar la sequedad al 40%.

Después, en la sequería, mediante cilindros calientes, la sequedad llega al 90-95%, que es la propia del papel terminado.

Las operaciones de modificación del papel tienen por objeto cambiar algunas de sus propiedades superficiales como la lisura, reflectancia, etc.

Finalmente, el papel se enrolla en la bobina madre o de máquina, de la que se obtienen las bobinas definitivas mediante una rebobinadora-cortadora.

El proceso de combustión es el más antiguo que se conoce aplicado a los residuos agrícolas. Se utiliza para obtener calor, vapor de agua o electricidad en pequeñas plantas. En Estados Unidos existen muchas pequeñas centrales eléctricas que utilizan residuos agrícolas y de serrerías mezclados con fuel.

La humedad de los residuos agrícolas no ha de sobrepasar el 50-55%, pues en caso contrario el aporte de energía del residuo sería menor que el necesario para evaporar su humedad.

La eficacia energética de la combustión es baja, no rebasando nunca el 30% (con una humedad del 50% y un exceso de aire en la combustión del 25%, la eficacia no pasa del 20-22%).

Los equipos más difundidos para llevar a cabo la combustión son el horno leño-quemador, el quemador de sólidos pulverizados y el hogar para sólidos.

En el primero, la combustión se realiza en una cámara vertical, donde las partículas adquieren un movimiento espiral, que aumenta el tiempo de residencia para conseguir la combustión completa. Entre sus ventajas cabe citar su simplicidad, la regulación automática de la temperatura y de la entrada de combustible, su fácil explotación sin necesidad de personal cualificado, el rendimiento elevado debido al sistema de refrigeración de las paredes, la economía de la energía generada y el que no es necesario parar la operación cuando se cambia de combustible.

El quemador de sólidos pulverizados es muy flexible, pues puede quemar sólidos, líquidos, gases y mezclas de sólidos con líquidos y/o gases. Tiene las siguientes ventajas: buena y simple regulación de la forma y longitud de la llama, buen rendimiento térmico, fácil mantenimiento y no es necesario parar la operación cuando se cambia de combustible.

El hogar para sólidos es un hogar tradicional, generalmente con emparillado en gradería y fijo, cargándose manualmente o mediante tornillo sinfín.

La combustión de residuos agrícolas tiene dos ventajas importantes. La primera es que proporciona una elevada temperatura de llama: del orden de los 1.000 °C cuando se utiliza un exceso de aire para la combustión del 50-60% y unas pérdidas caloríficas del 50-60%, y cerca de los 2.000 °C si las pérdidas caloríficas son bajas y se utilizan pequeños excesos de aire. Una segunda ventaja es que los gases de combustión tienen una proporción muy pequeña de anhídrido sulfuroso (pues los residuos agrícolas contienen unos porcentajes de azufre muy pequeños, del orden de 0,01 a 0,06%); ello tiene la ventaja de la poca contaminación y del alargamiento de la vida de las instalaciones por su pequeña corrosión.

Comparando los residuos agrícolas con otros combustibles como propano, fuel y carbón, se comprueba que el poder calorífico de los residuos agrícolas es similar al de los carbones de alto contenido de cenizas (40-50%), del orden 4.000 a 5.000 kcal/kg. Por otra parte, el precio de la kcal obtenida por combustión de residuos agrícolas es menor que el de los combustibles fluidos y del orden del de los combustibles sólidos fósiles de alto contenido de cenizas, con la ventaja adicional de que los residuos agrícolas tienen unos contenidos de cenizas muy bajos (2-6%).

El proceso de gasificación consiste en la oxidación parcial de los residuos agrícolas para obtener monóxido de carbono, hidrógeno, metano, nitrógeno y anhídrido carbónico principalmente, en proporciones que dependen de la materia prima considerada y de las condiciones del proceso.

Se pueden distinguir tres tipos de procesos:

- 1) Exotérmicos, que utilizan oxígeno o aire para obtener monóxido de carbono o monóxido de carbono y nitrógeno (gas pobre).
- 2) Endotérmicos, que utilizan vapor de agua para obtener monóxido de carbono e hidrógeno (gas de síntesis).
- 3) Equilibrados o mixtos, que utilizan oxígeno y vapor de agua o aire y vapor de agua para obtener monóxido de carbono e hidrógeno o monóxido de carbono, hidrógeno y nitrógeno. Estos pueden a su vez ser simultáneos o sucesivos, dependiendo de que los reactivos (oxígeno, aire y vapor) se introduzcan al mismo tiempo o uno después del otro.

Existen muchos tipos de gasificadores, siendo los más importantes los de lecho fijo, lecho fluidizado, gasificador para polvo, Seri, Battelle, Lurgi y AGIP.

Los gases de la gasificación pueden emplearse para obtener gases combustibles o productos químicos. Entre los gases combustibles se pueden destacar el I.B.G. (gas de poder calorífico medio), G.N.S. (gas natural sintético), metanol e hidrocarburos mediante el proceso de Fischer-Tropsch. Entre los productos químicos pueden distinguirse los obtenidos a partir del monóxido de carbono (fosgeno, formiato de metilo, formamida, ácido fórmico, carbonilos, negro de gas, ácido acrílico, acrilatos, etc.) y los obtenidos a partir de monóxido de carbono e hidrógeno (amoníaco, ácido nítrico, nitrato amónico, hidracina, urea, ácido cianhídrico, aldehídos, explosivos, etc.).

El proceso de pirólisis consiste en la degradación térmica de las moléculas complejas de los residuos agrícolas en ausencia de oxígeno. Este proceso exige un aporte térmico, que puede provenir de la combustión de parte los residuos agrícolas o de los productos de pirogenación.

El proceso comienza a 250-300 °C, dando lugar a gases, líquidos y sólidos en proporciones variables dependiendo de la materia prima y de la temperatura y tiempo de proceso. Los gases están constituidos por anhídrido carbónico, monóxido de carbono, hidrógeno, metano, etano y acetileno principalmente, dependiendo su composición fundamentalmente de la temperatura. Los líquidos están constituidos por ácidos, derivados heterocíclicos y compuestos fenólicos, y los sólidos por cenizas, sólidos orgánicos convertidos y carbono fijo originado en la descomposición.

En la pirólisis se pretenden dos opciones: obtener gases y sólidos u obtener líquidos y sólidos. En la primera se opera de forma que los líquidos se craqueen, obteniendo, además de un residuo sólido, diferentes gases (I.B.G., G.N.S., gas de síntesis del amoníaco, gas de síntesis del metanol, etc.), dependiendo de la materia prima y de las condiciones de operación. Si se pretenden líquidos y sólidos es necesario desecar previamente la materia prima.

Los equipos utilizados en la pirólisis son similares a los empleados en la gasificación, pero sin aporte de oxígeno o aire.

Desde el punto de vista químico-industrial, de la pirólisis se pueden beneficiar, por separado, los gases, los líquidos y los sólidos. Los gases han de depurarse, eliminando materias en suspensión (mediante ciclones, borboteo, electrofiltros, etc.), vapores de benceno, naftaleno, etc. (por lavado con aceite de alquitrán) y compuestos de azufre (por absorción, adsorción, etc.).

Para los gases de pirogenación caven tres posibilidades de aprovechamiento: como combustibles, para síntesis de amoníaco y fraccionándolos por condensación fraccionada para obtener etano, eteno, metano, nitrógeno e hidrógeno, que se aprovechan por separado.

En el aprovechamiento de los líquidos de pirogenación se distinguen dos fracciones: acuosa o amoniaca y aceitosa o alquitrán.

De la primera, que representa una pequeña fracción del total, puede obtenerse sulfato amónico. La segunda se destila para dar: aceite ligero ($<180^{\circ}\text{C}$), aceite medio ($180\text{-}230^{\circ}\text{C}$), aceite pesado ($230\text{-}270^{\circ}\text{C}$), aceite de antraceno ($270\text{-}350^{\circ}\text{C}$) y brea ($>350^{\circ}\text{C}$).

Mediante diversas operaciones de destilación, refinado, lavado, rectificación y enfriamiento, se obtienen, de las fracciones anteriores, diversos productos como benceno, tolueno, xilenos, fenoles, naftalina, antraceno, brea, etc., que tienen multitud de aplicaciones en síntesis químicas y como insecticidas, disolventes, combustibles, desinfectantes, pinturas, impermeabilizantes, colorantes, etc.

Los sólidos de la pirogenación de los residuos agrícolas son muy escasos. El más importante es el coque, que puede emplearse como combustible, reductor metalúrgico, materia prima de gases de síntesis o de gasificación y síntesis química (carburo cálcico y cianamida cálcica).

El proceso de licuefacción consiste en tratar los residuos agrícolas con hidrógeno, con monóxido de carbono o con monóxido de carbono e hidrógeno a presión y temperatura elevadas y en presencia de catalizadores para obtener directamente combustibles líquidos.

La licuefacción de los residuos agrícolas se inspira en el tratamiento paralelo del carbón, si bien existen notables diferencias, ya que mientras que en el carbón se trata de una hidrogenación, en el caso de los residuos agrícolas lo que ocurre es una eliminación de oxígeno.

Los combustibles líquidos obtenidos no están completamente desoxigenados, pues su fórmula empírica aproximada es $\text{CH}_{1,26}\text{O}_{0,25}$. Por ello, teniendo en cuenta las fórmulas aproximadas de los residuos urbanos ($\text{CH}_{1,68}\text{O}_{0,61}$), agrícolas ($\text{CH}_{1,47}\text{O}_{0,68}$) y forestales ($\text{CH}_{1,27}\text{O}_{0,83}$), se comprende que sean estos últimos los más idóneos para obtener líquidos combustibles según la reacción:



En el proceso de licuefacción de residuos agrícolas, una vez secados éstos, se mezclan con una suspensión reciclada de catalizador, materia prima no convertida y combustible obtenido. Al mismo tiempo en este mezclador se aporta oxígeno para obtener CO que se une a una corriente reciclada de este gas. La mezcla pasa al rector que genera unos gases ácidos y una suspensión de catalizador, materia prima no convertida y combustible obtenido. De los gases se separa primero el CO_2 y después mediante un doble tratamiento

criogénico y con tamices moleculares, la mayor parte de monóxido de carbono, que se recicla al mezclador, quedando una corriente de monóxido de carbono e hidrógeno que se utiliza como combustible en el secado. La corriente de suspensión se divide en dos: una se recicla al mezclador y otra se somete a una purificación y concentración para separar combustible líquido y una suspensión enriquecida en sólidos que se une a la corriente de recirculación.

El combustible obtenido tiene un poder calorífico de unas 7.000 kcal/kg. La eficiencia energética del proceso es del 50-55%.

El proceso de obtención de bioalcohol comprende las siguientes operaciones: Almacenamiento de la materia prima, tratamientos de acondicionamiento de las materias primas, tratamiento de prehidrólisis, hidrólisis, fermentación y separación del alcohol.

El almacenamiento es similar al empleado en la fabricación de papel.

El tratamiento de acondicionamiento de la materia prima consiste en una reducción de tamaño, que puede ser en húmedo o en seco según las características de la materia prima, una clasificación de materiales en diferentes fracciones y la separación de materiales extraños.

El tratamiento de prehidrólisis es necesario si la hidrólisis posterior es enzimática. Este tratamiento puede ser físico (irradiación, vaporización, etc.), químico (utilizando reactivos como hidracina, cadoxeno, CMCS, etc.) o biológico (utilizando enzimas ligninasas y xilanasas). Con estos tratamientos se consigue disminuir la cristalinidad de la celulosa, separar la lignina y la hemicelulosa de la α -celulosa y separar la γ -celulosa, que produciría en la hidrólisis posterior pentosas y, en la fermentación, furfural, que perjudica a los microorganismos encargados de llevar a cabo la fermentación alcohólica.

La hidrólisis puede ser ácida o enzimática. La ácida utiliza ácidos como el clorhídrico; sulfúrico, fosfórico y fluorhídrico; la concentración de ácido puede ser elevada como en el caso del proceso Bergius, o baja como en el caso de los procesos Madison y Scholler.

La hidrólisis enzimática utiliza celulasas, β -glucanasas, celobiohidrolasas, glucanasas y glucosidasas, que forman un sistema enzimático complejo que actúa sobre la celulosa para degradarla a azúcares simples. Para la producción de estas enzimas se utilizan cepas de *Trichoderma viride* y *Aspergillus phoenis*, obteniéndose rendimientos del 60-90%, dependiendo de las materias primas y las condiciones del proceso.

La fermentación se lleva a cabo por microorganismos como los de la familia *Saccharomyces*. Con bacterias termófilas como la *Zymomonas mobilis* se consigue, a 37 °C y 10 horas, un 12% de alcohol. Los fermentadores utilizados pueden tener diferentes configuraciones: Tanque agitado, mezcla completa,

batería de mezcla completa, columna de platos perforados, mezcla completa con recirculación de levaduras, torre, torre inclinada, torre de relleno, diálisis, rotatorio, fibra hueca, pistón, pistón con levaduras inmovilizadas, extractivo, flash, etc.

Una variante del proceso es la que realiza la hidrólisis y la fermentación de manera simultánea, con objeto de disminuir el tiempo de proceso y evitar la inhibición del sistema de celulasas, pues los azúcares fermentan a medida que se forman. El proceso Gulf/Arkansas utiliza *Trichoderma reesi* y *Saccharomyces* y el proceso MIT *Clostridium thermocellum*.

La separación de alcohol se realiza por destilación. Como la concentración de alcohol es baja (8-12%) se está estudiando, para ahorrar energía en la destilación, la separación del alcohol y agua por medio de desecantes (fécula de maíz, óxido cálcico, etc.), extracción con disolventes (ftalato de dibutilo, etc.), empleo de membranas selectivas y utilización de zeolitas que absorben el agua.

El proceso de obtención de biogás (mezcla de metano y anhídrido carbónico principalmente), consta de las siguientes operaciones: Almacenamiento de las materias primas, acondicionamiento de las materias primas, digestión, separación de lodos y agua depurada y separación de metano.

El almacenamiento y acondicionamiento de las materias primas es similar al del proceso de obtención de bioalcohol.

En el digestor, los materiales celulósicos se transforman anaeróbicamente en biogás mediante un sistema constituido por bacterias hidrolíticas, acetogénicas y metanogénicas principalmente.

La separación de lodos y agua se lleva a cabo en un decantador convencional y la separación del metano del biogás mediante absorción del anhídrido carbónico con disoluciones acuosas con o sin reacción química.

El proceso de obtención de proteínas unicelulares o microbianas (SCP) se fundamenta en la capacidad de algunos microorganismos (hongos y levaduras) para aprovechar diversos sustratos de los residuos agrícolas para su nutrición y crecimiento, aumentando así el contenido proteínico de los materiales tratados, que pueden emplearse para alimento o pienso de ganado.

La producción de SCP puede conseguirse por hidrólisis y fermentación consecutivas o por hidrólisis y fermentación simultáneas. En el primer caso, después de unos tratamientos previos para acondicionar la materia prima, se procede a una hidrólisis enzimática con celulasas y posteriormente a una fermentación aerobia con levaduras. En el segundo caso, mediante microorganismos celulolíticos de crecimiento rápido, como el *Chaetomium cellulolyticum*, se realiza conjuntamente la hidrólisis y la fermentación aerobia.

El proceso Waterloo consiste en un pretratamiento de los residuos agrícolas con sosa, seguido de una esterilización y un enfriamiento, para alimentar el fermentador que se carga además con nutrientes y *Chaetomium cellulolyticum*, obteniéndose una suspensión de la que separa en primer lugar agua y después se somete a un secado para dar lugar a un producto con el 10-12% de humedad y una riqueza proteínica del 30-35%.

La producción de SCP presenta varias ventajas:

- 1) Los microorganismos no dependen de las condiciones agrícolas ni del clima, ya que se cultivan en fermentadores.
- 2) Los tiempos de duplicación o crecimiento son cortos (10 a 120 minutos, frente a las 2 a 6 horas de las algas, a las 1 a 2 semanas de algunas plantas y a los 2 a 8 semanas del ganado).
- 3) Posibilidad genética de mejorar el contenido proteínico.
- 4) La producción no está limitada por la superficie o por la luz solar.
- 5) La eficacia de la conversión es elevada. Por ejemplo de una Ha de terreno pueden obtenerse 4.000 kg de maíz, que proporcionan el alimento de ganado vacuno para conseguir 85 kg de proteínas; de esa cantidad de maíz pueden obtenerse 2.400 kg de carbohidratos que por fermentación darían lugar a 360 kg de SCP.

