

MEDIO AMBIENTE Y SALUD

José Antonio Morales González
Jorge Alberto Mendoza Pérez
Jorge Chanona Pérez
Eduardo Osiris Madrigal Santillán
Sergio Odín Flores Valle
Ángel Morales González
Pablo Ligero Martínez Risco

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Luis Gil Borja

Rector

Humberto Veras Godoy

Secretario General

Marco Antonio Alfaro Morales

Coordinador de la División de Extensión

José Luis Antón de la Concha

Director del Instituto de Ciencias de la Salud

Josefina Reynoso Vázquez

Jefa del Área Académica de Farmacia

Graciela Nava Chapa

Jefa del Área Académica de Medicina

Enrique Rivas Paniagua

Director de Ediciones y Publicaciones

Abel L. Roque López

Subdirector de Ediciones y Publicaciones

Primera edición: 2009

© Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Abasolo 600, Centro, Pachuca, Hidalgo, México, CP 42000
Correo electrónico: editor@uaeh.edu.mx

Prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el consentimiento escrito de la UAEH.

ISBN 978-607-482-063-8

Composteo, biofermel y biogás

Biol. Juan Manuel BARRERA HERRERA
IN Laura MUÑOZ ALVARADO
Dr. Jorge A. MENDOZA PÉREZ
Dr. Ernesto ALANÍS GARCÍA
Dr. Jorge CHANONA PÉREZ

EL COMPOSTEO es la degradación microbiana de sólidos orgánicos generalmente por medio de una respiración aerobia (aunque puede ser anaerobia) que a su vez pasa por una fase inicial lenta mesofílica (30-40°C) y luego por una termofílica (60-70°C) para enfriar una vez que se ha realizado la degradación del material orgánico; cuando participan lombrices durante las siguientes etapas denominadas de conversión y curación se llama al proceso vermicomposteo. El producto final de esta degradación es un material rico en nutrientes asimilables, componentes minerales y en donde se ha transformado el carbono orgánico en CO_2 y el nitrógeno orgánico en nitratos (NO_3^-), a lo cual se le denomina proceso de mineralización.

Proceso de composteo y vermicomposteo

El composteo comienza a partir de un cúmulo de materia orgánica rica en hongos y bacterias. Una vez que estos microorganismos comienzan con el proceso de descomposición, primero se eleva la temperatura entre 30°C y 40°C como consecuencia de las oxidaciones biológicas exotérmicas y debido a que los materiales orgánicos poseen muy mala conductividad térmica se aísla el calor causando que la mayor parte de éste permanez-

ca dentro del cúmulo de materia o pila orgánica, llegando a alcanzar hasta los 70°C (fase termofílica) para luego enfriarse paulatinamente al concluir la descomposición (Figura 10-1). En el vermicomposteo tras la fase termofílica, las lombrices mejoran el proceso al consumir suelo con materia orgánica y hojas y continuar la descomposición de la materia orgánica. Como liberan la materia parcialmente digerida rica en hormonas y enzimas, estos compuestos enriquecen el suelo y ayudan al crecimiento de las plantas, debido a que se incrementa la velocidad de mineralización del nitrógeno y se modifican los índices de conversión del N-NH_4^+ a N-NO_3^- . Además, las lombrices se desplazan por la composta y airean el material lo cual permite que el proceso de respiración aerobia continúe y aportan al suelo un recubrimiento de polisacáridos que forma parte de sus desechos fecales denominado *casting* que es un excelente abono orgánico, confiriéndole propiedades aglutinantes y de alta capacidad de absorción y retención de agua al biomaterial.

Temperatura. La pérdida de calor es proporcional a la superficie, y la generación de calor al volumen, por tanto, en los grandes cúmulos la temperatura aumentará paulatinamente, es decir, en forma continua pero lenta, mientras que en las pilas más pequeñas se mantendrá temporalmente a 40°C. Los microorganismos mesófilos que ini-

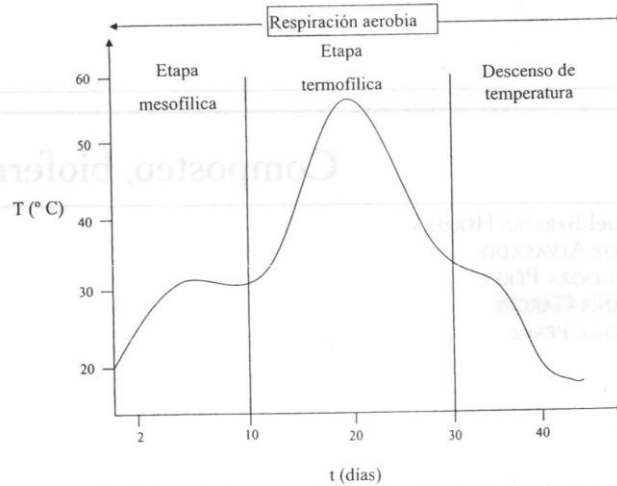


Figura 10-1. Etapas del proceso de composteo. En la primera etapa llamada mesofílica la temperatura oscila entre los 20 a 40°C y se inician los procesos oxidativos aerobios. En la fase mesofílica la temperatura llega a alcanzar hasta los 70°C (lo regular es entre 50 y 60°C) y es cuando se da la degradación de los compuestos orgánicos, mineralizándose el carbono, nitrógeno, fósforo y azufre. La tercera etapa es la de descenso de temperatura aunque algunos autores la indican como una segunda fase mesofílica. Tras estas etapas que en conjunto se denominan de degradación, prosiguen los procesos de conversión y curación.

cieron el calentamiento inicial son reemplazados a esta temperatura por organismos termófilos que se encargan de calentar la composta hasta los 70°C. Es durante la fase termofílica cuando la descomposición de la materia orgánica es más rápida.

Humedad. La humedad deseada es entre 40% y 60%. Un mismo contenido de humedad puede representar diferentes grados de disponibilidad de agua para los microorganismos, según las características físicas y químicas de los materiales orgánicos en uso. La actividad de agua es el factor que mejor describe el estado en que ésta se encuentra presente y el grado de dificultad que pueden tener los diversos tipos de microorganismos para su aprovechamiento. Existe una cantidad mínima de humedad (40%) necesaria para la actividad microbiana, asimismo, si la cantidad de agua es excesiva (> 60%) disminuyen los espacios libres en el material y se produce una fermentación anaerobia.

Aereación. Su finalidad es suministrar oxígeno y extraer el calor producido. La cantidad de oxígeno consumida durante el composteo de-

pende de la temperatura dentro del cúmulo, del tamaño de sus partículas y del tipo de materiales que lo componen. Los microorganismos requieren un 5% de oxígeno (el aire que respiramos contiene cerca de 21%), la manera práctica de oxigenar una composta es volteando los cúmulos o pilas regularmente, en las vermicompostas aunque también se deben voltear, los túneles creados por las lombrices permiten una mejor aireación. Cuando la temperatura de las capas intermedias del cúmulo se acerca a 70°C o cuando su humedad excede el 60% es entonces cuando se debe realizar la aeración a través de un volteo periódico.

Relación carbono/nitrógeno (C/N). Este es probablemente el aspecto más importante del composteo. Casi todos los microorganismos usan 30 partes en peso de carbono por cada parte de nitrógeno, por lo que una relación C/N de 30 es la más adecuada para una buena fermentación. Sin embargo, existen relaciones ya bien establecidas (Tabla 10-1). A pesar de que los materiales usados

Tabla 10-1. Relaciones C/N típicas para diferentes residuos agrícolas

Relación C : N	
Hojas secas	40-80 : 1
Papel	170 : 1
Residuos vegetales	15 : 1
Cortes de grama	19 : 1
Paja	80 : 1
Estiércol de vaca	29-56 : 1
Estiércol de caballo	18 : 1
Madera triturada	500 : 1

para la composta sean bajos en nitrógeno, se puede producir una mezcla fermentable mezclando con materiales ricos en dicho elemento procurando una relación máxima a 30, ya que de lo contrario el nitrógeno se puede perder en forma de amoníaco.

Cambios durante el composteo

- Los microorganismos degradan los carbohidratos y lípidos presentes, hasta donde les es posible.
- El pH inicial es similar al de los vegetales (6.0), en las etapas iniciales de composteo el pH disminuye debido a la producción de ácidos orgánicos. Posteriormente al aumentar la temperatura aumenta el pH y se estabiliza en una escala alcalina, debido a la producción de amoníaco.
- El nitrógeno soluble se absorbe inmediatamente y el insoluble se solubiliza antes de ser absorbido. La mayor parte del nitrógeno sintetizado se encuentra como proteína.

Adición de calcio

La adición de CaCO_3 o Ca(OH)_2 acelera la velocidad de descomposición de los materiales orgánicos, pero su desventaja es la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco.

Ecología microbiana en el proceso de composteo

De acuerdo con los valores sucesivos de temperatura que se presenten durante el proceso de composteo cambia la población microbiana. Durante la etapa inicial (mesofílica) se desarrollan hongos y bacterias productoras de ácido; por arriba de 40°C predominan bacterias y hongos termófilos y actinomicetos; alrededor de los 70°C crecen bacterias esporulantes y, por último, al disminuir la temperatura además de los hongos y bacterias mesófilas, aparecen protozoarios, nemátodos e insectos en el material fermentado.

Hongos. Son los responsables de la degradación de celulosa y hemicelulosa. A temperatura inicial proliferan los hongos saprobios mesófilos, los cuales son sustituidos por hongos termófilos al alcanzar los 40°C y 60°C .

Bacterias y actinomicetos. La gran carga bacteriana inicial de mesófilos produce un aumento en la temperatura de la composta, pero al llegar a los 55°C y 65°C disminuyen considerablemente. El desarrollo de las bacterias termófilas es inverso.

Las bacterias mesófilas consumen carbohidratos fácilmente degradables, mientras que las termófilas consumen además lípidos y hemicelulosas.

Los actinomicetos, cuya vida es viable a temperaturas mayores, se encargan de degradar hemicelulosa y celulosa.

Uso de las fermentaciones biológicas: enriquecimiento de compostas con biofermel

La fermentación biológica es un proceso bioquímico conocido y empleado desde hace más de 6 mil años en la elaboración de pan y vino. Estrictamente es el mecanismo a través del cual los microorganismos obtienen su energía utilizando reacciones químicas en donde ciertas sustancias orgánicas, actúan como donadores y receptores de electrones, es decir se oxidan y reducen (proceso bioredox). La fermentación mejor estudiada es la de los azúcares o hidratos de carbono. Durante este proceso de fermentación se efectúa una oxidación parcial de los átomos de carbono del com-

puesto orgánico (azúcar) y, por tanto, sólo una pequeña cantidad de energía potencial disponible se libera. Para que ocurra la fermentación debe participar un biocatalizador denominado enzima que se encuentra, lo produce y/o libera algún tipo de microorganismo, como pueden ser las levaduras, hongos o diferentes bacterias. Desde hace más de 20 años, Viniestra González desarrolló un proceso de pre-fermentación de melaza de caña de azúcar en presencia de estiércol y urea. La mezcla obtenida de esta pre-fermentación se denomina biofermel y estimula la ganancia de peso en el ganado rumino a los que se complementa su dieta con esta mezcla. Además de este aprovechamiento del fermento, se han realizado estudios de la adición de biofermel a suelos y a diferentes mezclas de compostaje, obteniéndose una composta de alta calidad.

Características fermentativas del biofermel. La composición bromatológica del biofermel se observa en la Tabla 10-2.

Cualidades fermentativas del estiércol. Para observar los productos de la fermentación obtenidos con estiércol se toman muestras representativas del estiércol tanto fresco como almacenado. Sobre el estiércol se realizan determinaciones de nitrógeno total por Kjeldahl y humedad, además de ácidos grasos volátiles y ácido láctico, después que el estiércol se fermenta con melaza-urea y agua en las mismas proporciones que se utilizan para producir el alimento. Las mezclas se agitan y se mantienen a 39°C por 48 horas.

Evolución del pH. El pH del biofermel oscila entre 5.0 y 6.5 pero se observa un incremento del pH (hasta 7.8) alrededor de 8 horas durante el

principio de la fermentación, debido al desprendimiento de amoníaco producido por la fuerte actividad de ureasa sobre la urea del estiércol. El pH desciende durante la segunda etapa de la fermentación debido a la abundante proliferación de lactobacilos, usando la técnica del tubo rodado. Junto con el crecimiento de lactobacilos existe una producción considerable de ácido láctico que neutraliza el amoníaco y hace descender el pH.

Ácidos grasos volátiles. Mientras que el ácido láctico en las condiciones prácticas de fabricación de alimentos se produce en buena cantidad, en todas las ocasiones, los ácidos grasos volátiles no se producen siempre en las mismas proporciones ni cantidades.

Complemento de composta con biofermel. La mezcla de composta adicionada con 10% en peso de biofermel permitió la obtención de mayor biomasa vegetal en cultivos experimentales (Figura 10-2). Este tipo de resultados incentivan la utilización de productos de fermentación microbiana durante los procesos de compostaje con el fin de obtener compostas con una mayor calidad y aprovechamiento.

Diseño y operación de sistemas para la obtención de biogás y composta a partir de mezclas de residuos agrícolas

El incremento constante en el precio del petróleo y los combustibles ha obligado a las naciones a proponer nueva políticas energéticas. Mientras que para los países de primer mundo se abre la oportunidad de la explotación de fuentes energéticas baratas pero limitadas, para los países marginados representa el lejano principio de un probable próspero futuro económico. Por lo anterior existe una inmediata necesidad de hallar y desarrollar tecnologías de bajo costo mediante el uso inteligente de recursos locales, que puedan estar al alcance de los países pobres y así ayudar a resolver su principal problema: el suministro de potencia y energía. Las plantas generadoras de biogás o digestor anaerobio son un mecanismo ecológicamente puro para obtener potencia y energía, ya que proveen un combustible limpio, amplio y eficientemente aplicable, con combustión exenta

Tabla 10-2. Composición bromatológica porcentual del biofermel

Composición bromatológica del biofermel (%)	
Proteína cruda	12
Extracto etéreo	0.5
Fibra cruda	14
Minerales	12
Extracto libre de nitrógeno	61.5

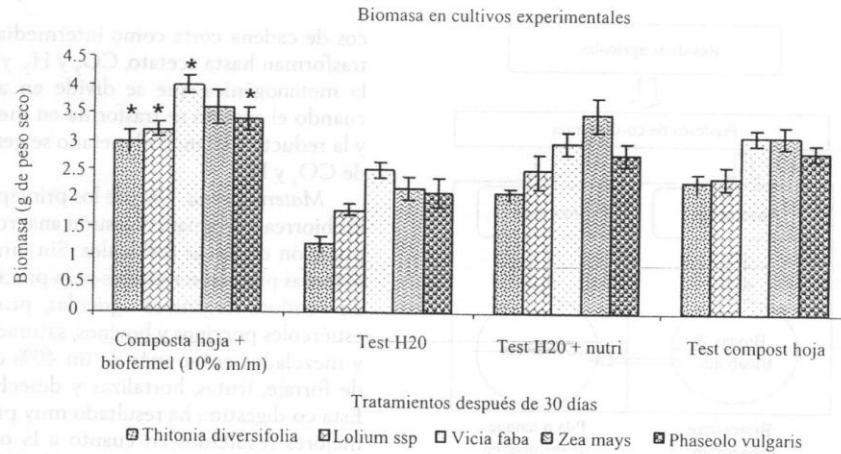


Figura 10-2. Desarrollo de cultivos al enriquecer composteo con biofermel (10% en peso). Plántulas de cinco diferentes especies vegetales, con 1 día de germinadas, fueron cultivadas en arena sílica esterilizada y desinfectada y se utilizó como soporte complementario composta de hoja enriquecida con biofermel al 10% en peso (la relación de arena sílica / soporte complementario fue de 3:1). Los testigos fueron: a) Test H₂O, plántulas en arena sílica más agua desionizada. b) Test H₂O + nutri, plántulas en arena sílica más agua enriquecida con nutrientes (dosis 10 ml por día). c) Test composta hoja, plántulas en arena sílica con composta de hoja como soporte complementario (relación 3:1) y sin adición de nutrientes. Las condiciones experimentales de temperatura, luz y humedad fueron controladas en invernadero. El pH de todos los experimentos se mantuvo entre 5.5 y 6.0 para igualar las condiciones que el biofermel proporciona a la composta. Se irrigó agua destilada a todos los cultivos cada 2 días, manteniendo a su capacidad de campo la mezcla arena/composta. El exceso de agua lixiviaba por orificios inferiores barrenados en los almácigos. En el caso del biofermel por ser un fermento líquido, se volvió a adicionar cada 10 días durante el periodo experimental de 30 días (3 adiciones totales) en la proporción establecida (10% en peso con respecto a la composta), esto debido a que al irrigar los cultivos con agua, se pierde el biofermel por dilución y lixiviación. La relación C / N varió para cada grupo experimental pero los valores establecidos se mantuvieron constantes a lo largo del estudio: 30-40 para el grupo con la mezcla composta / biofermel, 20-30 para la composta de hoja, 30-35 para el testigo con nutrientes y menor de 3 para el grupo testigo en agua desionizada. Los resultados indican una mayor ganancia de biomasa para las plántulas que crecieron en la composta enriquecida con biofermel. El análisis de varianza (anova) indica diferencias significativas (*p<0.005) para el crecimiento de casi todas las especies de plántulas tratadas con composta más biofermel, salvo en el caso del maíz (*Zea mays*), con respecto a sus correspondientes grupos testigo.

de humo, y además, un fertilizante no patógeno (composta) rico en material orgánico, humus, nitrógeno, fósforo y potasio. (Figura 10-3).

El digestor anaerobio es un biorreactor o tanque semicerrado, carente de suministro continuo de aire, donde la materia orgánica y el agua residual se transforman por acción de microorganismos de tipo anaerobio en biogás (60% de gas metano) y en bioabono, que preferentemente debe ser sometido a un proceso de compostaje para mejorar su calidad. La operación de los biorreactores se

basa en un principio muy simple: hacer que los contaminantes se conviertan en sustrato (alimento) de los microorganismos, y que estos, al mismo tiempo que se alimentan y aumentan su población, descontaminen el agua residual y produzcan metano. El biogás generado debe estar compuesto en un 60% y 80% de metano, CO₂ de 15-39 %, otros gases como H₂, vapor de agua y NH₃ entre 1% y 5 % y hasta 5 000 ppm de H₂S. Para construir un digestor o sistema generador de biogás, es necesario conocer la curva de crecimiento de los

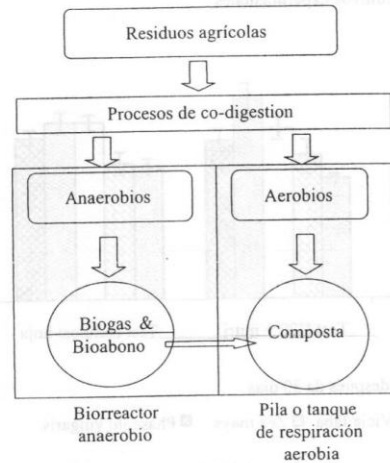


Figura 10-3. Tratamiento de residuos agrícolas para obtención de biogas y composta. El proceso mixto implica el uso de biorreactores anaerobios (digestión anaerobia) para la generación de biogas y bioabono y sistemas de compostaje. El bioabono como residuo estable, puede ser transferido a una pila o tanque de compostaje para mejorar la calidad de este producto.

microorganismos con los que se está trabajando. De forma general la curva de crecimiento microbiano consta de cuatro fases en el tiempo (Figura 10-4), que son:

1. Fase de latencia.
2. Fase de crecimiento logarítmico.
3. Fase de crecimiento menguante.
4. Fase endógena.

El factor clave de todo digestor es mantener los microorganismos en la fase c de máximo crecimiento de la población, la mayor parte del tiempo que sea posible, para optimizar la eficiencia de los procesos de biodegradación. El proceso de digestión anaerobia comprende tres etapas generales: la hidrolítica donde los macrocompuestos orgánicos como carbohidratos, proteínas y lípidos se degradan a sus componentes básicos (aminoácidos, azúcares, alcoholes y ácidos grasos), la acidogénica donde por procesos fermentativos y de oxidación anaeróbica se generan ácidos carboxili-

cos de cadena corta como intermediarios, que se transforman hasta acetato, CO_2 y H_2 , y por último, la metanogénica que se divide en acetoclástica cuando el acetato se transforma en metano y CO_2 y la reductiva cuando el metano se genera a partir de CO_2 y H_2 .

Materia prima. Uno de los principales usos de los biorreactores para digestión anaerobia es la depuración de aguas residuales. Sin embargo, estos sistemas pueden ser usados para procesar mezclas de residuos orgánicos agrícolas, principalmente estiércoles porcinos y bovinos, saturados con agua y mezclados en no más de un 40% con residuos de forraje, frutas, hortalizas y desechos cárnicos. Esta co-digestión ha resultado muy práctica y con mejores resultados en cuanto a la obtención de biogás debido a que la relación C:N:P se mantiene en los niveles óptimos (300:5:1) por el aporte de los diferentes residuos agrícolas en digestión.

Optimización de la producción de gas. Para lograr una óptima producción de gas se deben cuidar especialmente la acidez, los sólidos, la relación C/N, la temperatura y el tiempo.

Acidez. Debido a que las bacterias metanogénicas se desarrollan en un pH estrictamente cercano a 8, una solución muy ácida puede frenar bruscamente el proceso de fermentación, mientras que un medio alcalino promueve la formación de CO_2 y por tanto, se disminuye el proceso de digestión.

Sólidos. La fermentación anaeróbica de materia orgánica se efectúa mejor si ésta tiene un contenido de 8% de sólidos.

Relación C/N. Cuando la concentración de nitrógeno es baja (relación alta C/N) las bacterias perecen por falta de éste y las que no lo hacen reutilizan el N de las células de aquellas para poder sobrevivir. Sin embargo, debido a que parte del C se oxida a CO_2 , la concentración de C disminuye y, a pesar de que el proceso puede continuar, su velocidad disminuye considerablemente. Por otro lado, si la relación C/N es baja el C se terminará antes que el N, produciendo un cese en el proceso de fermentación y una pérdida del N remanente. La ventaja de inducir una respiración anaerobia es que, como una buena parte del carbono se convierte a CH_4 , hay una pérdida mínima de N.

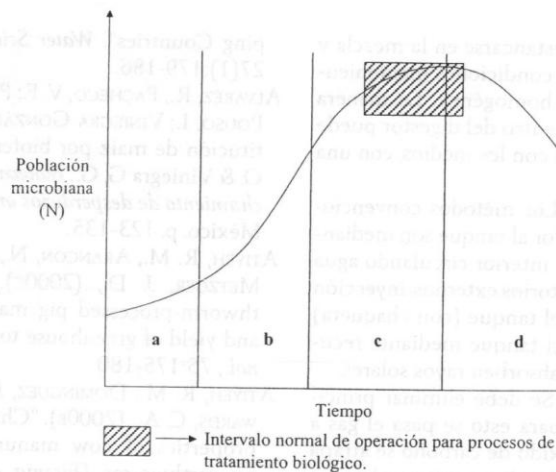


Figura 10-4. Curva típica de crecimiento microbiano. La curva de crecimiento microbiano consta de cuatro fases en el tiempo que son: (a) Fase de latencia, (b) Fase de crecimiento logarítmico, (c) Fase de crecimiento menguante, (d) Fase endógena. Por lo general, el factor principal en todo biorreactor es mantener los microorganismos en la fase c de máximo crecimiento de la población, la mayor parte del tiempo que sea posible, para optimizar la eficiencia de los procesos de biodegradación.

Temperatura. Generalmente, la digestión por bacterias se realiza en temperaturas que oscilan entre 30°C y 70°C, efectuándose mejor en estas últimas (50°C-70°C). Se conoce que la producción de gas disminuye rápidamente a temperaturas menores a 16°C, y es casi nula a 10°C. Estudios previos demuestran que al inducir la producción de gas por lo general hay una respuesta óptima a 35°C.

Obtención global de gas en función del tiempo. El tiempo en el cual se genera una cantidad mayor de gas, según los reportes, es de 20 días, con una producción cercana al 80% del total.

Tamaño de la instalación. Para definir el tamaño y el diseño correcto para una planta generadora de gas se deben considerar algunos aspectos importantes.

Para determinar el tamaño de la planta se debe precisar:

- Tamaño del digestor. El cual debe ser adecuado para permitir el manejo de la cantidad deseada de materia prima.
- Tamaño del colector de gas. La recolección y almacenamiento del gas puede realizarse de

dos formas. La primera, mediante el domo colector instalado en el digestor, en cuyo caso el colector de gas debe diseñarse con capacidad suficiente para recibir como mínimo el 50% de la producción diaria de gas. La segunda forma consiste en la construcción de un tanque almacén separado del digestor.

- Tamaño de la tubería para gas. Las tuberías de gas deben ser adecuadas para llevar el gas del digestor hasta el tanque de almacenamiento, o bien, al lugar de consumo inmediato. El diámetro de ésta debe ser el adecuado para evitar caídas de presión.

Agitación del digestor. La agitación es de suma importancia para elevar la velocidad de producción de gas, ya que hay una elevación importante de esta al renovar el contacto entre las bacterias metanogénicas y el sustrato, resultando como consecuencia un aumento en la cantidad del mismo. La agitación es necesaria ya que la espuma resultante del fermento se estanca en la superficie reduciendo la generación de gas; así mismo, las partículas indigeribles a partir de las cuales se genera

metano pueden flotar o estancarse en la mezcla y la agitación cambia estas condiciones manteniendo siempre una mezcla homogénea. La manera de efectuar la agitación dentro del digestor puede ser manual o, si se cuenta con los medios, con una bomba centrífuga.

Suministro de calor. Los métodos convencionales para suministrar calor al tanque son mediante serpentines fijos en su interior circulando agua caliente, serpentines rotatorios externos, inyección de vapor por el fondo del tanque (con chaqueta) y calentamiento solar del tanque mediante recubrimientos oscuros que absorben rayos solares.

Purificación del gas. Se debe eliminar principalmente la humedad, para esto se pasa el gas a través de cal viva, el bióxido de carbono se atrapa en carbonatos o hidróxidos de potasio y calcio. La eliminación de sulfuro de hidrógeno se hace al pasar el gas a través de compuestos sólidos básicos o bien mediante el uso de biofiltros y bioscrubbers.

Generación de bioabono y su transformación en composta. Los bioabonos son fertilizantes obtenidos de la fermentación anaerobia de sustancias orgánicas generalmente desechos de sistemas agropecuarios o de otras fuentes. Estas fermentaciones realizadas principalmente para la obtención de biogás, dejan como subproducto una materia orgánica estabilizada, rica en elementos minerales que puede ser usada como abono y acondicionador de suelo. Asimismo, este residuo estable puede ser mezclado con otro tipo de material orgánico aún sin mineralizar (o degradar) y ser sometido a un proceso de compostaje o vermicompostaje, lo que incrementa la calidad del compost final.

Bibliografía

- AMAYA, M. R. (1981). "Diseño y operación de un sistema experimental para la obtención de gas metano a partir de desechos agrícolas" en Monroy H, O. & Viniestra G, G., *Biotecnología para el aprovechamiento de desperdicios orgánicos*. 1ª. Ed., AGT Editor, México, p. 103-112.
- ALAERTS, GJ.; VEENSTRA, S.; BENTVELSEN, M.; VAN DUUL, LA. (1993). "Feasibility of anaerobic sewage treatment in sanitaria strategies in developing Countries". *Water Science and Technology*. 27(1):179-186.
- ALVAREZ, R.; PACHECO, V. F.; PÉREZ-GAVILÁN, J.P.E.; POUSO, I.; VINIEGRA GONZÁLEZ, G. (1981). "Sustitución de maíz por biofermel" en Monroy H, O. & Viniestra G, G., *Biotecnología para el aprovechamiento de desperdicios orgánicos*. AGT Editor, México. p. 123-135.
- ATIYEH, R. M., ARANCON, N., EDWARDS, C. A. AND METZGER, J. D., (2000C). "Influence of earthworm-processed pig manure on the growth and yield of greenhouse tomatoes." *Biores. Technol.*, 75:175-180.
- ATIYEH, R. M., DOMÍNGUEZ, J., SUBLER, S. AND EDWARDS, C. A., (2000B). "Changes in biochemical properties of cow manure during processing by earthworms (*Eisenia andrei*, Bouché) and the effects on seedling growth." *Pedobiologia*, 44:709-724.
- ATIYEH, R. M. SUBLER, S., EDWARDS, C. A., BACHMAN, G., METZGER, J. D., AND SHUSTER, W. (2000A). "Effects of vermicomposts and composts on plant growth in horticultural container media and soil." *Pedobiologia*. 44:579-590.
- ARSOV, R.; RIBAROVA, I.; NIKOLOV, N.; MIHAILOV, G.; TOPALOVA, Y.; KHOUDARY, E. (1999). "Two-phase anaerobic technology for domestic wastewater treatment at ambient temperature". *Water Science and Technology*. 39(8)115-122.
- AZBAR, N.; URSILLO, P.; SPEECE, R. (2001). "Effect of process configuration and substrate complexity on the performance of anaerobic process". *Water Research*, 35(3):817-829.
- BEHLING, E.; DIAZ, A.; COLINA, G.; HERRERA, M.; GUTIERREZ, E.; CHACIN, E.; FERNANDEZ, N.; FORSTER, CF. (1997). "Domestic wastewater treatment using a UASB reactor". *Bioresource Technology*. 61:239-245.
- BODIK, I.; HERDOVÁ, B.; DRTEL, M. (2000). "Anaerobic treatment of the municipal wastewater under psychrophilic conditions". *Bioprocess Engineering*. 22:385-390.
- CHEKNICHARO, CA.; CARDOSO, MR. (1999). "Development and evaluation of a partitioned upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor for the treatment of domestic sewage from small villages". *Water Science and Technology*. 40 (8):107.

- ELMITWALLI, T.; SOELLNER, J.; DE KEIZER, A.; BRUNING, H.; ZEEMAN, G.; LETTINGA, G. (2001a) "Biodegradability and change of physical characteristics of domestic sewage". *Water Research*. 35(5):1311-1317.
- FORESTI, E. (2001b). "Perspectives on anaerobic treatment in developing countries". *Water Science and Technology*. 44(8):141-148.
- FRANKIN, RJ. (2001). "Full-Scale experiences with anaerobic treatment of industrial wastewater". *Water Science and Technology*. p. 44.
- GARCIA DE CORTÁZAR, V.; VARNERO, M. T.; ESPINOSA, M. (2001) "Effect of Biofertilizer Over-Photosynthetically Active Area, Cladode Production, and Nitrogen Recovery Efficiency in a Cactus-Pear Crop (*Opuntia ficus-indica* L.) on the First Year After Plantation." *J. PACD* 1:93-104.
- GONZÁLEZ, JM.; ANSOLA, G.; LUIS, E. (2001). "Experimental results on constructed wetland pilot system". *Water Science and Technology*. 44(11):387-392.
- GONÇALVES, RF.; CHARLIER, AC.; SAMMUT, F. (1994). "Primary fermentation of soluble and particulate organic matter for wastewater treatment". *Water Science and Technology*. 30 (6):53-62.
- GRANADIPATHY, A.; POLPRASERT, C. (1993). "Treatment of a domestic wastewater with UASB reactor". *Water Science and Technology*. 27(1):195-203.
- MÉNDEZ, D. (2002). "Biodegradación anaerobia de compuestos tóxicos en aguas residuales industriales". Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Santiago de Compostela.
- MENDOZA-PÉREZ, J. A.; BARRERA-HERRERA, J. M. (2005) "Obtención de compostas y vermicompostas enriquecidas con diferentes productos de fermentación." Informe de avance de desarrollo tecnológico, Dirección de General de Investigación y Desarrollo, Secretaría de Marina, México, p. 1-16.
- LEAL-LARA, H. (1981). "Principios de composteo: Fermentación al aire libre de materia orgánica" en Monroy H, O. & Viniegra G, G., *Biotecnología para el aprovechamiento de desperdicios orgánicos*. AGT Editor, México. p. 95-99.
- LIGERO, P. (2001c). "Hidrólise e granulación no tratamento anaerobio de augas residuais urbanas". *Tesis Doctoral*. Departamento Química Física e Enxeñaría Química I. Universidade da Coruña.
- REINECKE, A. J.; VILJOEN, S. A.; SAAYMAN, R. J. (1992). "The suitability of *Eudrilus eugeniae*, *Perionyx excavatus* and *Eisenia fetida* (Oligochaeta) for vermicomposting in Souther Africa in terms of their temperature requirements." *Soil Biology and Biochemistry* 24:1295-1307.
- SAGARPA/DIRECCIÓN GENERAL DE APOYOS PARA EL DESARROLLO RURAL (2007). "Abonos Orgánicos." Cuadernos Técnicos, Talleres gráficos de la Subsecretaría de Desarrollo Rural, México D.F., capítulo 6, p. 6-1.
- SANTAMARIA R., S. (1996). Aspectos biotecnológicos del proceso de vermicomposteo y su aplicación agronómica. *Tesis Profesional. Facultad de Ciencias Agrícolas*, Universidad Veracruzana, México, p. 51-59.
- SZTERN, D.; PRAVIA, M. A. (2005). "Manual para la elaboración de compost, bases conceptuales y procedimientos." *Organización panamericana de la salud / Organización mundial de la salud*, Uruguay, p. 35-69.
- VIEIRA, SM.; CARVALHO, JL.; BARIJAN, FP.; RECH, CM. (1994). "Application of the UASB technology for sewage treatment in a small community at Sumare, Sao Paulo State". *Water Science and Technology*, 30 (12):203-210.
- ZEEMAN, G.; LETTINGA, G. (1999). "The role of anaerobic digestion of domestic sewage in closing the water and nutrient cycle at community level". *Water Science and Technology*, 39(5):187-194.
- ZEHNDER, AJ.; STUM, W. (1988). "Geochemistry and biogeochemistry of anaerobic Habitats". In "Biology of Anaerobic Microorganisms", Wiley, New York, p. 1-38.

**INNOVACION DE PRODUCTOS DE ALTO VALOR AGREGADO
A PARTIR DE LA TUNA MEXICANA**

Ma. Teresa Sumaya-Martínez¹, Teodoro Suárez Diéguez, Nelly del Socorro Cruz Cansino,
Ernesto Alanís García, José G. Sampedro²

Innovation of high added value products using Mexican prickly pears

ABSTRACT

In the world, Mexico is the major producer of prickly pears and also has the largest number in varieties. However, in addition to its highly seasonal production, prickly pears are consumed just by a small segment of the Mexican population. Therefore, the promotion of prickly pears consumption in the form of new derivative products by emphasizing its bioactive properties seems to be a possible solution to its low consumption. Recent studies from European and Asian laboratories showed that some prickly pears varieties have a significant antioxidant activity. In Mexico, prickly pears producers are looking for new ways of commercialization. In this regard, similar studies are underway surveying those varieties from the highly producing Mexican states with the goal to develop new functional products with high added value. In addition, the use of prickly pears as a raw material for the cosmetic and pharmaceutical industries is being considered and seems to be highly promising.

Keywords: Prickly pears, antioxidant activity, innovation, functional food.

RESUMEN

México es el primer productor de tuna a nivel mundial y posee diversas variedades de este fruto. Sin embargo, su consumo esta limitado a un determinado segmento de la población y es estacional, lo que desincentiva el aumento de su producción. Una posible solución es la promoción del consumo de tuna por sus propiedades bioactivas en forma de productos de alto valor agregado. Estudios recientes realizados en Europa y Asia han reportado que algunas variedades de tuna de esas regiones presentan una importante actividad antioxidante. En México, se llevan a cabo estudios sobre la actividad antioxidante de las variedades de tuna que se producen en diversos estados con la finalidad de producir alimentos funcionales con un alto valor agregado; con ello se busca diversificar su comercialización e incrementar su producción. Existe además un uso potencial de la tuna como materia prima en otros ramos industriales como la cosmética y farmacéutica.

Palabras clave: Tuna, actividad antioxidante, innovación, alimentos funcionales.

INTRODUCCIÓN

La tuna es una baya ovalada con un gran contenido de semillas y de cáscara semidura con espinas. La tuna es la fruta del nopal (*Opuntia spp.*), el cual es nativo de América y propio de las regiones áridas y semiáridas del mundo. En México se reconocen alrededor de 23 variedades de tunas comestibles, agrupando a las tunas blancas, púrpuras, rojas, anaranjadas y amarillas. Las tunas de pulpa blanca y cáscara verde son las de mayor consumo, su producción en el ámbito nacional corresponde a casi el 95% de la producción total. La producción de tuna en nuestro país registra actualmente un volumen superior a las 400,000 toneladas.

Área Académica de Nutrición, Instituto de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Actopan-Tilcuautla ExHacienda la Concepción S/N, C.P. 42160, Pachuca, Hidalgo.

²Department of Molecular Cellular and Developmental Biology, University of Michigan, 830 North University, Ann Arbor, Michigan, 48109, USA.

* Autor para la correspondencia: teresumaya@hotmail.com.

Las zonas de mayor producción se localizan en las regiones sur, centro y centro-norte, que incluyen Puebla, Estado de México, Hidalgo, Zacatecas, Guanajuato y San Luis Potosí. Dichos estados en conjunto aportan más del 95% de la producción nacional de tuna y la economía de muchos de sus pobladores depende en gran medida de este sector productivo. México es el principal productor de tuna en el mundo y aporta poco más del 45% de la producción mundial, sin embargo, sólo exporta el 1,5% de su producción. El principal exportador mundial es Italia, que exporta más del doble de lo que exporta México, principalmente a los mercados de Estados Unidos, Canadá y Europa. La capacidad exportadora de Italia se explica en el hecho de que este país dispone de excelentes instalaciones para el empaque y de redes de distribución bien establecidas. Por lo que es capaz de satisfacer los altos requerimientos de calidad que exigen los mercados internacionales (Mandujano *et al.*, 2002; SIAP, 2001).

Uno de los principales problemas para los productores de nopal es la estacionalidad de las cosechas; ya que la mayor parte de la tuna se cosecha en 90 días. Después de este periodo los precios se desploman a niveles incosteables para el productor. Además, en los años de alta producción suele perderse hasta un 60% de la cosecha debido principalmente a problemas de comercialización tales como: a) la falta de un mercado asegurado, b) la carencia de espacios de acopio y almacenamiento adecuados para la conservación de la tuna, c) la ausencia de infraestructura de transporte para movilizar el producto y d) la desarticulación de la cadena productiva en donde los procesos de producción y comercialización típicamente se dan por separados.

Ante este panorama, una estrategia para elevar la competitividad de la tuna mexicana en el mercado nacional e internacional, y que fomentaría la aplicación de prácticas agrícolas sustentables y sostenibles, es la innovación y creación de nuevos productos de alto valor agregado. Lo cual puede lograrse determinando las propiedades nutricionales y funcionales que la diferenciarían de los productos análogos. Además, le otorgaría ventajas competitivas frente a un mercado nuevo de productos funcionales en constante crecimiento y permitiría la diversificación de su comercialización no sólo como fruta fresca sino como un ingrediente o excipiente de alto valor para la industria alimentaria.

MÁS QUE UNA FRUTA DE TEMPORADA

El consumo de la tuna fresca en México tiene una larga tradición y preferencia, el consumo per cápita se ha incrementado en los últimos años de manera importante; actualmente se consume en promedio 3.5 Kg. anuales por habitante sin embargo, comparativamente con otras frutas este consumo per cápita es bajo, ya que contrasta fuertemente con el de la naranja (37.6 Kg.) y el plátano (20.7 Kg.) (Corrales y Flores, 2003). El consumo de tuna tiende a disminuir en la medida en que se avanza en la mejora de ingresos en los estratos sociales, pues cuando hay un mayor ingreso se deciden por comprar frutas más convencionales o consideradas de mayor valor nutritivo. Así el consumo de la tuna se da principalmente en la población de bajos ingresos por sus propiedades sensoriales y su bajo precio, y sólo pocos consumidores de mayor poder adquisitivo consideran sus propiedades nutricionales y funcionales.

La composición química de la tuna consiste de 85 % de agua, 14 % de azúcares y de 1 % de proteína. En la pulpa los compuestos bioactivos encontrados en mayor cantidad son la vitamina C, vitamina E y polifenoles; algunos aminoácidos que se presentan en la pulpa son la prolina, la glutamina y en mayor cantidad la taurina. Además, tiene altas cantidades de minerales como calcio y magnesio. Cuando la fruta es pelada, la gran cantidad de fibra insoluble la proveen las semillas.

Cabe mencionar, que los niveles de vitamina C en la tuna son similares a los de otras frutas comunes entre las cuales se encuentran la manzana, pera, uva y plátano. La cantidad de los nutrimentos en la tuna esta influenciado por diversos factores físicos, químicos y biológicos, tales como la variedad, especie, estado de madurez, factores precosecha y poscosecha (Gurrieri *et al.*, 2000; Galati *et al.*, 2003; Flores-Hernández *et al.*, 2004).

LA TUNA COMO UN ALIMENTO FUNCIONAL

Un alimento funcional se define como cualquier alimento que en forma natural o procesada, además de sus componentes nutritivos, contiene componentes adicionales que favorecen a la salud. Una propiedad funcional es la característica de un alimento, en virtud de sus componentes químicos (sin referencia a su valor nutritivo), que afecta positivamente una o más funciones específicas en el cuerpo, en tal medida que resulta relevante para el estado de bienestar o la reducción de riesgo de una enfermedad (Alvídrez-Morales *et al.*, 2002). Con lo que los alimentos funcionales son una forma mediante la cual la industria intenta extender los beneficios de los alimentos naturales, nutritivos y con ventajas para la salud.

La tuna presenta una concentración significativa de compuestos bioactivos tales como vitamina C, vitamina E, pigmentos, polifenoles y taurina, los cuales en conjunto podrían desempeñar un papel importante si se le considerara como alimento funcional (Piga, 2004).

ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE

Una propiedad funcional muy importante es la actividad antioxidante. Un antioxidante es una molécula que previene la formación descontrolada de radicales libres o inhiben sus reacciones con estructuras celulares (proteínas, carbohidratos, lípidos y ADN). Como parte del envejecimiento normal del organismo humano se producen un número considerable de sustancias químicamente inestables, llamadas especies reactivas de oxígeno que en su mayoría son radicales libres (Chihuaílaf *et al.*, 2002). El daño oxidativo que estas especies pueden producir en las células es de consecuencias críticas para su función, por lo que se le asocia con el desarrollo de numerosas patologías y enfermedades degenerativas como el cáncer y la diabetes.

Además de las defensas endógenas del organismo contra el daño oxidativo, la ingesta de moléculas antioxidantes puede neutralizar la producción y exposición a los radicales libres y disminuir los efectos adversos de las especies reactivas del oxígeno en el cuerpo humano. Los antioxidantes de origen exógeno pueden ser de diversa naturaleza, como la vitamina C, la vitamina E, carotenoides, polifenoles, flavonoides, entre otros fotoquímicos. Estos difieren unos de otros tanto en su mecanismo como en su sitio de acción. Existe evidencia científica de que los compuestos antioxidantes de frutas y vegetales pueden prevenir el daño oxidativo en las células, con lo que se reduce el riesgo de cáncer, enfermedades cardiovasculares, neurodegenerativas, diabetes, entre otras (Prior, 2003; Choi *et al.*, 2004; Kuti, 2004). Estudios recientes en variedades de tunas rojas de origen asiático han mostrado una importante actividad antioxidante al reducir significativamente el estrés oxidativo en pacientes (Bundinsky *et al.*, 2001; Tesorie *et al.*, 2004; Tesoriere *et al.*, 2005). Los pigmentos rojos (betalainas) parecen ser los principales responsables de esta actividad (Stintzing *et al.*, 2001; Stintzing *et al.*, 2005; Tesoriere *et al.*, 2003; Butera *et al.*, 2002). Dichos estudios reportan que el 15% de la actividad antioxidante total de la tuna es responsabilidad de la vitamina C y el resto de la actividad antioxidante es debido a los compuestos polifenólicos, flavonoides y a las betalainas (Galati *et al.*, 2003). Las betalainas son pigmentos solubles en agua y tienen dos derivados: las betacianinas que dan el color rojo-púrpura y las betaxantinas, que proporcionan un color amarillo-naranja. Estos pigmentos presentan una importante actividad antioxidante sin mostrar efectos tóxicos en humanos (Castellar *et al.*, 2003).

Recientemente, se han propuesto a estos pigmentos como una alternativa para sustituir los colorantes sintéticos en industrias como la alimentaria, cosmética y farmacéutica. Algunos estudios han evaluado la biodisponibilidad en humanos de los pigmento betalaínas de las tunas púrpuras. Se ha observado que las betalaínas están involucradas en la protección antioxidante de las células (Butera *et al.*, 2002). Estudios recientes han reportado en variedades de tuna de origen italiano y asiático una actividad neuroprotectora contra daños oxidativos inducidos en cultivos de células corticales (Dok-Go *et al.*, 2003).

Así mismo, se ha demostrado que las tunas de color púrpura presentan una mayor capacidad antioxidante en comparación con las tunas amarillas y verdes. El estudio propuso que la actividad antioxidante está relacionada con la concentración de betalaínas, las cuales están presentes en mayor proporción en las tunas rojas y púrpuras, y en menor cantidad en las tunas de color amarillo y verde (Stintzing *et al.*, 2005). Es así, como estos pigmentos además de contrarrestar el estrés oxidativo podrían ser utilizadas como colorantes naturales en los alimentos y otros productos.

COMO INGREDIENTE ALIMENTARIO: SUSTITUTO DE ANTIOXIDANTES SINTÉTICOS

Los antioxidantes naturales han despertado el interés para emplearlos como sustitutos de los antioxidantes sintéticos, tales como el butilhidroxitolueno (BHT), butilhidroxianisol (BHA) y butilhidroxiquinona (BHQT), que se adicionan a los alimentos susceptibles a la oxidación lipídica. Sin embargo, algunos estudios han demostrado que estos antioxidantes sintéticos poseen efectos citotóxicos (Lewis, 1989). Por lo que el uso de extractos antioxidantes de tuna podría ser una alternativa para la industria alimentaria. Por otro lado, también podría considerársele como una fuente de colorantes, fibra, vitaminas, por mencionar algunos de sus componentes de alto valor agregado (Alacid *et al.*, 2006).

POTENCIAL COMERCIAL DE LA CÁSCARA DE LA TUNA

En nuestro país los desechos o subproductos agrícolas (cáscaras, bagazo, frutas y vegetales dañados) representan un grave problema ambiental ya que no se cuenta con políticas adecuadas para su manejo. Dichos subproductos son generados en grandes volúmenes y solo una mínima parte es reutilizada en la producción de alimento animal.

Si se considera que la pulpa de la tuna constituye entre el 30 y 40 % del total en peso y el resto corresponde a la cáscara, esta última podría ser utilizada como una fuente de diversos productos. Un estudio reciente sobre la caracterización de la cáscara de la tuna de *Opuntia ficus-indica* reportó que ésta contiene una buena fuente de ácidos grasos poliinsaturados y antioxidantes naturales como la vitamina E, tocoferoles y la vitamina C (Ramadan y Mørsel, 2003; Cerezal y Duarte, 2005). Por lo que, este subproducto de la tuna pueden constituir una interesante fuente de fitoquímicos, los cuales pueden ser extraídos y potencialmente utilizables en la preparación de productos de alto valor agregado. Sin embargo, para esto es necesario garantizar la inocuidad del subproducto y la ausencia de pesticidas.

COMPETIR CON IDEAS CREATIVAS E INNOVADORAS

En un mercado competido y saturado de ideas, imágenes y productos que prometen fomentar la salud del consumidor, se requieren de ideas creativas e innovadoras que satisfagan las necesidades del mercado. Estudios de consultoría de mercadotecnia coinciden en que el número de consumidores interesados en el cuidado de su salud, en prevenir y corregir enfermedades con base en una dieta balanceada es cada vez mayor. Lo cual establece las condiciones para que un gran número de empresas apuesten a la innovación de productos funcionales.

La innovación de productos funcionales de tuna mexicana podría ser la base para el establecimiento de estrategias comerciales para aumentar su competitividad, lo cual requeriría de la incorporación de un adecuado marketing. En mercados con un exceso de marcas como es el de los alimentos funcionales: jugos, yogures, productos lácteos, entre otras, es necesario la innovación de productos enfocado directamente a cierto tipo de consumidor con requerimientos nutricionales especiales y que satisfagan las necesidades de este público, tales como productos ricos en antioxidantes, vitaminas, calcio, etc.

En el ámbito de los productores sería necesario replantear la necesidad de promover el cultivo de tunas púrpuras, rojas y amarillas (ya que éstas sólo representan el 5% del total producido a escala nacional) dado que en diversos estudios realizados estas variedades han presentado una mayor actividad antioxidante que la tuna blanca. Paralelamente, se requiere de nuevas y exitosas estrategias de mercadotecnia para promover el consumo de estas tunas por sus propiedades antioxidantes, lo cual repercutiría en fomentar su producción.

CONCLUSIONES

La comercialización de la tuna por sus propiedades funcionales puede generar ventajas competitivas que pueden traducirse en oportunidades de negocio y de desarrollo de nuevos productos. Esta estrategia de valorización implica profundizar en el mejoramiento de la calidad de la tuna durante toda la cadena productiva y establecer prácticas agrícolas sustentables, sostenibles y competitivas que permitan el aprovechamiento integral tanto de la pulpa como de la cáscara de la tuna.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvídrez-Morales, A.; González-Martínez, B.; Jiménez-Salas, Z. 2002. Tendencias en la producción de alimentos: alimentos funcionales. *Revista de salud pública y nutrición* 3(3).
- Bundinsky, A.; Wolfram, R.; Oguogho, A.; Efthimiou, Y.; Stamatopoulos, Y.; Sinzinger, H. 2001. Regular ingestion of *Opuntia Robusta* lowers oxidation injury. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids* 65(1), 45-50.
- Butera, D.; Tesoriere, L.; Di Gaudio, F.; Bongiorno, A.; Allegra, M.; Pintaudi, A. M.; Kohen, R.; Livrea, M. A. 2002. Antioxidant activities of sicilian prickly pear (*Opuntia Ficus Indica*) fruit extracts and reducing properties of its betalains: betanin and indicaxanthin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50(23), 6895-6901.
- Castellar, R.; Obón, J. M.; Alacid, M.; Fernández-López J. A. 2003. Color properties and stability of betacyanins from *Opuntia* fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51(9), 2772-2776.
- Cerezal, P.; Duarte, G. 2005. Utilización de cáscaras en la elaboración de productos concentrados de tuna (*Opuntia ficus indica* (L.) Miller). *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. 7, 61-83.
- Corrales, G. J.; Flores V. C. 2003. Nopalitos y tunas: producción, comercialización, poscosecha e industrialización. pp: 39-96. Universidad Autónoma de Chapingo, CIESTAAM-Programa nopal.
- Chihuailaf, R.; Contreras, P.; Wittwer, F. 2002. Patogénesis del estrés oxidativo: consecuencias y evaluación en salud animal. *Veterinaria Mexico* 33(3), 265-283.

Choi, S-H.; Song, H S.; Ukeda, H.; Sawamura, M. 2004. Radical-scavenging activities of citrus essential oils and their components: detection using 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 48(9), 4156-416.

Dok-Go, H.; Lee, K. H.; Kim, H. J.; Lee, E. H.; Lee, J.; Song, Y. S.; Lee, Y. H.; Jin, C.; Lee, Y. S.; Cho, J. 2003. Neuroprotective effects of antioxidative flavonoids, quercetin, (+)-dihydroquercetin and quercetin 3-methyl ether, isolated from *Opuntia ficus.indica* var. Saboten. *Brain Research* 965(1-2), 130-137.

Flores-Hernández, A.; Orona-Castillo, I.; Murillo-Amador, B.; Valdez Cepeda, R. D.; García-Hernández, J. L. 2004. Producción y calidad de nopalito en la región de la Comarca Lagunera de México y su relación con el precio en el mercado nacional. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 6, 23-34.

Galati, E. M.; Mondello, M. R.; Giuffrida, D.; Dugo, G.; Miceli, N.; Pergolizzi, S.; Taviano, M. F. 2003. Chemical characterization and biological effects of sicilian *Opuntia Ficus-Indica* (L.) .Fruit juice: antioxidant and antiulcerogenic activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51(17), 4903-4908.

Gurrieri, S.; Miceli, L.; Lanza, M.; Tomaselli, F.; Bocono, P. R.; Rizzarelli, E. 2000. Chemical characterization of sicilian prickly pear (*Opuntia ficus indica*) and perspectives for the storage of its juice. *Journal Agriculture and Food Chemistry* 48(11), 5424-5431.

Kuti, J.O. 2004. Antioxidant compounds from four *Opuntia* cactus pear fruit varieties. *Food Chemistry*. 85, 527-533.

Lewis, R. J. 1989. Food additives handbook. pp: 86, 99, 102. Van Nostrand Reinhold. USA.

Mandujano, M.; Golubov, J.; Reyes, J. 2002. Lo que usted quiso siempre saber sobre las cactaceas y nunca se atrevió a preguntar. *Biodiversitas* 40, 4-7.

Piga, A. 2004. Cactus pear: a fruit of nutraceutical and functional importance. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 6, 9-22.

Prior, L. R. 2003. Fruits and vegetables in the prevention of cellular oxidative damage. *The American Journal of of Clinical Nutrition* 78, 570-578.

Ramadan, M. F.; Mørsel, J.T. 2003. Recovered lipids from prickly pear *Opuntia Ficus Indica* (L.) Mill. peel: a good source of polyunsaturated fatty acids, natural antioxidant vitamins and sterols. *Food Chemistry* 83(3), 447-457.

Servicio de información agroalimentaria y pesquera (SIAP). 2001. Análisis de producción y consumo de tuna. México.

<http://www.siap.sagarpa.gob.mx/InfOMer/analisis/antuna.html>.

Stintzing, F. C.; Schieber, A.; Carle, R. 2001. Phytochemical and nutritional significance of cactus pear. *European Food Research and Technology* 212(4), 396-407.

Stintzing, F.C.; Herbach, K. M.; Mosshammer, M. R.; Carle, R.; Yi, W.; Sellapan, S.; Akoh, C. C.; Bunch, R.; Felker, P. 2005. Color, betalain pattern, and antioxidant properties of cactus pear (*Opuntia* spp.) clones. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53(2), 442-451.

Tesorie, L.; Butera, D.; Pintaudi, A. M.; Allegra, M.; Livrea, M. A. 2004. Supplementation with Cactus Pear (*Opuntia Ficus Indica*) Fruit Decreases Oxidative stress in Healthy Human: a Comparative Study with Vitamin C. *Am. J. Clin. Nutr.* 80(2): 391-395.

Tesoriere, L.; Butera, D.; Allegra, M.; Fazzari, M.; Livrea, M. A. 2005. Distribution of Betalain Pigments in Red Blood Cells Alter Consumption of Cactus Pear Fruits an Increased Resistance of the Cells to ex Vivo Induced Oxidative Hemolysis in Humans. *J. Agric. Food Chem.* 53: 1266-1270.

Tesoriere, L.; Butera, D.; D' Arpa, D.; Di Gaudio, F.; Allegra, M.; Gentile, C.; Livrea, M. A. 2003. Increased Resistance to Oxidation of Betalain – Enriched Human Low – Density Lipoproteins. *Free Radical Res.* 37: 689-696.

***(Artículo recibido en marzo del 2009 y aceptado para su publicación en enero del 2010).**

