



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



INSTITUTO DE INGENIERÍA DE
ALIMENTOS PARA EL DESARROLLO

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos para
el Desarrollo

LA FERMENTACIÓN COMO ESTRATEGIA PARA LA
MEJORA DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DE
RESIDUOS Y SUBPRODUCTOS DE ALIMENTOS DE
ORIGEN VEGETAL

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ciencia e Ingeniería de los Alimentos

AUTOR/A: Belda Palazón, Cristina

Tutor/a: Barrera Puigdollers, María Cristina

Cotutor/a: Seguí Gil, Lucía

Cotutor/a: Betoret Valls, Noelia

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE
VALÈNCIA**

***LA FERMENTACIÓN COMO
ESTRATEGIA PARA LA MEJORA
DE LAS PROPIEDADES
FUNCIONALES DE RESIDUOS Y
SUBPRODUCTOS DE ALIMENTOS
DE ORIGEN VEGETAL***

TRABAJO FIN DE MÁSTER UNIVERSITARIO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE
LOS ALIMENTOS

ALUMNO/A: Cristina Belda Palazón
TUTOR/A ACADEMICO: Cristina Barrera Puigdollers
COTUTOR/A: Lucía Seguí Gil
COTUTOR/A: Noelia Betoret Valls

Curso Académico: 2021-2022

VALENCIA, julio de 2022



RESUMEN

El desperdicio alimentario, junto con el hambre y la malnutrición, constituyen un reto prioritario para la sociedad actual. Todo ello, unido a los problemas medioambientales derivados de este desperdicio, exige la búsqueda de soluciones dirigidas al mejor aprovechamiento de los alimentos y sus residuos. En este contexto, la fermentación en estado sólido (SSF) se presenta como una herramienta prometedora, ya que se trata de una técnica verde que puede llevarse a cabo directamente sobre los residuos con el fin de generar productos con valor añadido. En este trabajo fin de máster, se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica de las aplicaciones de la SSF de residuos agroindustriales de origen vegetal. Para ello, se han consultado artículos publicados en los últimos 11 años. Los artículos consultados revelan que la SSF puede emplearse con distintos fines, destacando la producción industrial de enzimas y otros metabolitos de interés, tales como compuestos volátiles/aromas, ácidos orgánicos o pigmentos; la mejora del perfil nutricional y funcional con el fin de producir alimentos o ingredientes más nutritivos; y, por último, la obtención de extractos antioxidantes. Según la bibliografía consultada, los sustratos más empleados para la SSF son los residuos lignocelulósicos (salvado de arroz, salvado de trigo, harina de soja, etc.) y los residuos procedentes del procesado de frutas y verduras (piel de banana, piña, cáscara de granada, etc.). En cuanto al tipo de microorganismos fermentadores, destacan los hongos (*Aspergillus* spp., etc.) y las bacterias ácido-lácticas (*Lactobacillus* spp., *Lysinbacillus* spp., etc). Por otro lado, algunos pretratamientos y la suplementación de los sustratos determinan una mejora en el rendimiento y resultado de la fermentación. Muchos estudios encontrados en la bibliografía tienen como objetivo desarrollar nuevos modelos de predicción en los que se haga una optimización aproximada de la productividad de la técnica de la SSF.

Palabras clave: fermentación en estado sólido (SSF), residuos vegetales, enzimas, fenoles, extractos antioxidantes, ingrediente funcional.

RESUM

El desaprovechament alimentari, juntament amb la fam i la malnutrició, constitueixen un repte prioritari per a la societat actual. Tot això, unit als problemes mediambientals derivats d'aquest desaprovechament, exigeix la cerca de solucions dirigides al millor aprofitament dels aliments i els seus residus. En aquest context, la fermentació en estat sòlid (SSF) es presenta com una eina prometedora, ja que es tracta d'una tècnica verda que pot dur-se a terme directament sobre els residus amb la finalitat de generar productes amb valor afegit. En aquest treball fi de màster, s'ha dut a terme una revisió bibliogràfica de les aplicacions de la SSF de residus agroindustrials d'origen vegetal. Per a això, s'han consultat articles publicats en els últims 11 anys. Els articles consultats revelen que la SSF pot emprar-se amb diferents fins, destacant la producció industrial d'enzims i altres metabòlits d'interés, com ara compostos volàtils/aromes, àcids orgànics o pigments; la millora del perfil nutricional i funcional amb la finalitat de produir



aliments o ingredients més nutritius; i, finalment, l'obtenció d'extractes antioxidants. Segons la bibliografia consultada, els substrats més emprats per a la SSF són els residus lignocelulósics (segó d'arròs, salvat de blat, farina de soja, etc.) i els residus procedents del processament de fruites i verdures (pell de banana, pinya, corfa de magrana, etc.). Quant al tipus de microorganismes fermentadors, destaquen els fongs (*Aspergillus* spp., etc.) i els bacteris àcid-làctics (*Lactobacillus* spp., *Lysinbacillus* spp., etc.). D'altra banda, alguns pretractaments i la suplementació dels substrats determinen una millora en el rendiment i resultat de la fermentació. Molts estudis trobats en la bibliografia tenen com a objectiu desenvolupar nous models de predicció en els quals es faça una optimització aproximada de la productivitat de la tècnica de la SSF.

Paraules clau: fermentació en estat sòlid (*SSF), residus vegetals, enzims, fenols, extractes antioxidants, ingredient funcional.

ABSTRACT

Food waste, along with hunger and malnutrition, is a priority challenge for today's society. All this, together with the environmental problems resulting from this waste, requires the search for solutions aimed at making better use of food and food waste. In this context, solid state fermentation (SSF) is a promising tool, as it is a green technique that can be carried out directly on waste in order to generate value-added products. In this Master's thesis, a literature review of the applications of SSF of agro-industrial waste of plant origin has been carried out. To this end, articles published in the last 11 years have been consulted. The articles consulted reveal that SSF can be used for different purposes, notably the industrial production of enzymes and other metabolites of interest, such as volatile compounds/aromas, organic acids or pigments; the improvement of the nutritional and functional profile in order to produce more nutritious food or ingredients; and, finally, the obtaining of antioxidant extracts. According to the literature, the most commonly used substrates for SSF are lignocellulosic residues (rice bran, wheat bran, soybean meal, etc.) and residues from fruit and vegetable processing (banana peel, pineapple, pomegranate peel, etc.). As for the type of fermenting microorganisms, fungi (*Aspergillus* spp., etc.) and lactic acid bacteria (*Lactobacillus* spp., *Lysinbacillus* spp., etc.) stand out. On the other hand, some pretreatments and the supplementation of substrates determine an improvement in the yield and result of fermentation. Many studies found in the literature aim to develop new prediction models in which an approximate optimisation of the productivity of the SSF technique is made.

Keywords: solid state fermentation (SSF), plant residues, enzymes, phenols, antioxidant extracts, functional ingredient.



1. INTRODUCCIÓN

El desperdicio alimentario, debido a la generación de residuos durante el procesado de alimentos o a la pérdida de alimentos a lo largo de la cadena, constituye un serio problema de la sociedad actual por diversos motivos: económicos, sociales, medioambientales y sanitarios (Food 2030 Pathways for action, 2020).

En función de la fuente consultada, los términos subproducto y residuo tienen significados distintos, por lo que es interesante diferenciarlos. Según el Informe de Desperdicio Alimentario en la industria alimentaria y la distribución en España (MAPAMA, 2020), un subproducto se define como la materia generada como consecuencia del proceso productivo, que no constituye un producto acabado, pero es susceptible de ser aprovechado y/o generar un beneficio mientras que residuo se considera aquella materia generada como consecuencia del proceso productivo que finalmente no se aprovecha. No obstante, un residuo o parte del mismo puede transformarse en subproducto si se desarrolla el proceso mediante el cual pueda ser aprovechado, por lo que en ocasiones ambos términos se utilizan en contextos similares en la literatura científica. En 2019 se desperdiciaron 931 millones de toneladas de alimentos (UNEP, 2021) siendo 1/3 de ellos producidos a lo largo de la cadena alimentaria (Comunian et al., 2021) lo que engloba desde la producción hasta el consumo en los hogares, ocasionando graves problemas para el medio ambiente. Las industrias de los productos vegetales, frutas y hortalizas generan una parte importante de esos residuos como resultado de su procesado. Por ejemplo, en el caso de la patata se generan un 21% de residuos procedentes de la industria agroalimentaria, la mayor parte pieles y trozos, la industria del vino genera un 25% de residuos a partir de la materia vegetal procesada y la industria del aceite genera 4 toneladas por cada tonelada de aceite producido (Garmendia, 2021).

Por otro lado, el crecimiento continuo de la población y el agotamiento de los recursos naturales hacen peligrar el suministro de alimentos a nivel mundial. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), se estima que en el año 2050 la producción mundial de alimentos aumente un 60% debido a dicho crecimiento demográfico. Si no se ponen en marcha acciones específicas, este hecho empeorará los problemas de malnutrición actuales que engloban tanto la desnutrición como la obesidad, debida a los cambios en el estilo de vida.

Con el fin de paliar esta situación, la Organización de las Naciones Unidas incluye entre sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) el de reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita para el año 2030 (ODS 1 y 2), contribuyendo de este modo al desarrollo de un sistema alimentario sostenible además de combatir la pobreza y tomar medidas para mitigar el cambio climático.

Todo ello hace necesaria la búsqueda de nuevas estrategias de valorización que contribuyan a la economía circular de los residuos alimentarios y, concretamente para los residuos de origen vegetal antes de ser desechados completamente ya que se tratan de residuos ricos en nutrientes y compuestos bioactivos, tales como polisacáridos,



proteínas, vitaminas, minerales, polifenoles, flavonoides, carotenoides, etc. El avance tecnológico de los últimos años ha proporcionado conocimientos suficientes para afrontar estos problemas mediante operaciones de transformación ampliamente utilizadas y sostenibles. Una de las técnicas a destacar es la fermentación puede ser una alternativa útil y eficaz para paliar esta problemática y aprovechar el potencial nutricional de estos residuos.

Se define la fermentación como los cambios bioquímicos que tienen lugar en sustancias orgánicas como consecuencia de la actividad de enzimas microbianas. La presencia de microorganismos metabólicamente activos es, por lo tanto, esencial para que avance el proceso fermentativo (Arguedas-Gamboa, 2014). La fermentación de alimentos se remonta a siglos atrás considerándose una técnica de conservación de alimentos, una forma de obtener alimentos tradicionales y nutritivos además de con nuevos sabores, aromas y texturas en los que se fomenta el placer gastronómico (Xu et al., 2019). La fermentación es una estrategia verde y sostenible empleada como tratamiento para la valorización de residuos puesto que el consumo de energía es mínimo y la producción de gases con efecto invernadero queda muy reducida.

Los microorganismos más utilizados en la fermentación incluyen mohos, como *Aspergillus sp.* y *Penicillium sp.*, levaduras como *Saccharomyces cerevisiae*, *Andida krusei* y *Candida humilis* y bacterias, pertenecientes a los géneros *Lactobacillus*, *Streptococcus* o *Bifidobacterium* (Xiang et al., 2019). De entre los cultivos estrellas en la industria alimentaria destacan *Aspergillus sp.* y *Saccharomyces cerevisiae* debido a su alta capacidad de sintetizar metabolitos.

La fermentación puede llevarse a cabo de dos formas, mediante fermentación sumergida (Submerged Fermentation, SmF) o fermentación en estado sólido (Solid State Fermentation, SSF). La SmF consiste en el crecimiento de microorganismos en un medio líquido, en el cual el agua es el componente mayoritario del medio (Parzarenese, 2016). Por su parte, la SSF consiste en el crecimiento de microorganismos en materiales sólidos no sumergidos (Hesseltine, 1987).

Los residuos agroindustriales han sido tradicionalmente empleados como sustratos para la fermentación, sobre todo en la SSF. Los medios de cultivo empleados para la SmF incluyen como ingredientes tanto productos como subproductos agroindustriales. Se trata de productos o subproductos ricos en carbono o nitrógeno, nutrientes esenciales para los microorganismos que llevan a cabo la fermentación. Aquí encontramos ingredientes habituales tales como el licor de maceración del maíz, el suero lácteo o las harinas de soja o pescado. No obstante, el cultivo en estado sólido presenta más oportunidades de valorización de residuos o subproductos, ya que en este caso son los propios residuos los que configuran el sustrato para el crecimiento de los microorganismos. Tal es el caso de la piel de naranja, el salvado de trigo y arroz, el bagazo de caña de azúcar, la cáscara de plátano, la piel de patata, el orujo de manzana, los restos de soja, las tortas de prensado de aceite, además de los residuos de la



industria cervecera, láctea y conservera de pescado (Sadh et al., 2018). Otro tipo de residuos, sin embargo, no constituyen un medio de cultivo habitual, pero podrían fermentarse con el fin de aumentar su valor.

Así pues, el presente trabajo tiene como objetivo recopilar, analizar y discutir la información científica más relevante y reciente sobre la aplicación de la fermentación en estado sólido a subproductos de la industria alimentaria con el fin de dar valor a dichos residuos y obtener compuestos, ingredientes o alimentos, de elevado valor nutricional. Cabe mencionar que el estudio se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible planteados por las Naciones Unidas en 2015 con los que se pretende poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las condiciones de vida de la población mundial (ODS 1,2, 3, 7 y 13).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Para desarrollar el presente trabajo se han consultado bases de datos de investigación científica, documentos, libros, artículos y colecciones de trabajos publicados entre el año 2011 y la actualidad. En particular, las bases de datos empleadas fueron *Google Scholar*, *sciFinder*, *Scopus*, *ScienceDirect* y *Polibuscador de la UPV*.

En primer lugar, se realizó una búsqueda masiva empleando como palabras clave “fermentación en estado sólido”, “residuos vegetales”, “enzimas”, “fenoles”, “antioxidantes”, “antimicrobianos” y “enriquecimiento”, limitando la búsqueda desde 2011 hasta la actualidad. De los 92 documentos encontrados, se realizó un primer cribado en función del título, el resumen y las conclusiones, lo que redujo a 69 el número de documentos seleccionados, de los que finalmente solo 56 fueron empleados en la realización de este trabajo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se analiza y discute de forma crítica la información recopilada sobre la fermentación en estado sólido aplicada a la valorización de residuos vegetales generados por la industria alimentaria. Los artículos consultados permitieron agrupar los trabajos según la finalidad de los mismos: fermentar para obtener compuestos químicos de interés, tales como enzimas y otros metabolitos; fermentar para mejorar el perfil nutricional del sustrato, que podrá ser empleado como alimento o ingrediente; o bien fermentar para obtener extractos con elevada actividad antioxidante.

A continuación, se presentan en primer lugar las generalidades de la fermentación en estado sólido, destacando las principales diferencias con respecto a la fermentación sumergida. Seguidamente, se recogen evidencias de las aplicaciones descritas.



3.1. FERMENTACIÓN EN ESTADO SÓLIDO (SSF)

La SSF cobró especial importancia en el año 1940 con la producción de antibióticos como la penicilina, siendo este período denominado la Era de Oro de la fermentación industrial (Krishna, 2005). En los años 60 y 70, la SSF se consolidó como una solución para el aprovechamiento de los residuos agroindustriales y la reducción del impacto ambiental que estos generan (Pandey, 2003; Mitchell et al., 2006). Con suficiente oxígeno y un hábitat adecuado, la SSF permite obtener cantidades importantes de compuestos con alto valor añadido (ácido cítrico, enzimas, compuestos fenólicos, etc.) empleando residuos vegetales de bajo coste como sustrato, lo que garantiza la rentabilidad económica de este proceso biotecnológico (Torres-León et al., 20019)

La SSF presenta una serie de características que la diferencian de la SmF, y que la hacen especialmente interesante. Algunas de estas características se resumen en la tabla 1. La diferencia fundamental se debe al medio de cultivo. La SmF implica el crecimiento de microorganismos en un cultivo líquido que contiene nutrientes, un alto contenido de agua libre y una concentración de oxígeno donde los recursos se consumen rápidamente (Subramaniyam et al., 2012). Esta técnica es la más adecuada para microorganismos como bacterias, los cuales requieren un mayor contenido en humedad. Por el contrario, la SSF implica el crecimiento de microorganismos en sustratos sólidos rodeados de una fase gaseosa continua en la que, a pesar de la presencia de gotas de agua entre los espacios entre partículas, la cantidad de agua libre es escasa o inexistente y los espacios se llenan de gas favoreciendo el crecimiento de los microorganismos (Pandey, 2003). Esta técnica fermentativa favorecería el crecimiento de hongos u otros microorganismos con menores necesidades de humedad tales como las levaduras o los actinomicetos.

La menor disponibilidad de agua en la SSF aporta otras ventajas al proceso, tales como la menor posibilidad de contaminación por otros microorganismos o la menor formación de espumas, problema recurrente en la SmF. Por otro lado, el metabolito producido tras la SSF está más concentrado y suele recuperarse fácilmente por lavado, generando menor cantidad de efluentes en comparación con la SmF y facilitando las operaciones posteriores de recuperación (*downstream*). Adicionalmente, la posibilidad de dar uso a los residuos agroindustriales abarata los costes del medio de cultivo, además de tratarse de medios en los que algunos microorganismos (hongos, levaduras) encuentran su hábitat natural. En cuanto a la productividad del proceso fermentativo, generalmente la cantidad de metabolito generado por unidad de sustrato consumido resulta más favorable cuando el microorganismo se cultiva en estado sólido. Esto se debe a que el microorganismo encuentra un hábitat natural para su crecimiento, en el que los nutrientes se liberan progresivamente, reduciendo la inhibición por sustrato. No obstante, la menor homogeneidad del cultivo en estado sólido y la dificultad para escalar estos procesos, conlleva que el tamaño de los biorreactores sea notablemente inferior al de los biorreactores de tanque agitado habitualmente empleados para cultivo



sumergido, por lo que las producciones son significativamente inferiores a las que se obtienen mediante SmF.

Además, la SSF presenta una serie de ventajas de carácter general frente a la SmF (Pastrana, 1996), como una mayor facilidad para la obtención y aplicación del inóculo, pudiendo utilizarse esporas directamente en la mayoría de los casos, necesidades reducidas de disolventes para la extracción de productos, elevada aireación del sistema, lo que le hace especialmente adecuada para aquellos procesos que impliquen un metabolismo oxidativo intenso y bajos requerimientos energéticos.

Tabla 1. Diferencias entre la fermentación en estado sólido (SSF) y la fermentación sumergida (SmF) (Tabla adaptada de Zamakona, 2019)

| Parámetro | SSF | SmF |
|-------------------------------|--|---|
| Disponibilidad de agua | -Ausencia de agua libre -Menor posibilidad de contaminación -Ausencia de formación de espuma -Menos generación de efluentes | -Gran disponibilidad de agua libre -Mayor riesgo de contaminación -Posibilidad de formación de espuma y mayores costes en tratamientos de efluentes |
| Sustrato | -Bajo coste -Mínima necesidad de suplementación | -Puede requerir el uso de compuestos o suplementos de mayor coste |
| Adaptación del microorganismo | -La naturaleza del medio se asemeja al hábitat natural de hongos y levaduras | -Más adecuado para bacterias |
| Productividad | -Mayor producción de metabolito por unidad de sustrato | -Menor cuando se utilizan hongos |
| Procesos <i>downstream</i> | -Mayor simplicidad debido a que el producto está más concentrado | -Mayores costes por la purificación y concentración del producto final |
| Aspectos medioambientales | -El uso de desechos orgánicos como sustrato ayuda al control del desperdicio alimentario | -En caso de necesitar complemento sintético, mayor impacto ambiental |
| Escalado | -Caro y complejo -Pequeños volúmenes del biorreactor (menor producción) | -Relativamente sencillo y barato -Grandes volúmenes del biorreactor (mayor producción) |
| Control del proceso | -Más complicado por homogeneidad del cultivo | -Fácil control de temperatura, pH, humedad o aireación |

3.2. LA FERMENTACIÓN EN ESTADO SÓLIDO PARA LA OBTENCIÓN DE ENZIMAS Y OTROS METABOLITOS DE INTERÉS

En este apartado se recogen evidencias de estudios recientes dirigidos a mejorar la efectividad o el rendimiento de la SSF de residuos de origen vegetal para la obtención de enzimas y otros compuestos de interés, tales como conservantes, pigmentos o aromas. Para lograr la máxima producción de estos compuestos, las investigaciones profundizan en aspectos fundamentales de la SSF tales como la selección de la cepa microbiana y el tipo de sustrato o el establecimiento de las condiciones fisicoquímicas y/o biológicas que aseguren un adecuado crecimiento y actividad microbiana.

Las enzimas industriales son uno de los productos que se producen con más éxito comercial (Thomas et al., 2013). Suelen ser principalmente de origen microbiano, y muy pocas son de origen animal o vegetal. Tienen multitud de funciones tecnológicas, tanto



en la industria alimentaria como en la industria de detergentes, papel, cuero, etc. Muchas enzimas de origen microbiano tienen interés para la industria alimentaria; otras han encontrado aplicaciones de interés por su contribución a la valorización de residuos o la extracción de compuestos de interés a partir de éstos. Por ejemplo, la celulasa mejora la extracción de compuestos fenólicos con gran capacidad antioxidante y la recuperación de proteínas unicelulares (Budihal & Agsar, 2015); la α -amilasa actúa como mejorador de la textura del pan y de la pasta, además de mejorar sus propiedades organolépticas evitando sabores desagradables y un oscurecimiento excesivo (Martínez-Vera & Mendoza-Camejo, 2018); la proteasa facilita la obtención de polipéptidos y aminoácidos esenciales (Soares de Castro et al., 2015; Thakur et al., 2015); la quitosana actúa como espesante, gelificante y emulsionante, es un protector comestible y facilita la recuperación de proteínas procedentes de residuos de la industria alimentaria (Da Silva et al., 2012); y, finalmente, la invertasa actúa como mejorador de la flora intestinal (Veana et al., 2014).

En la tabla 2 se muestran, en función de la enzima producida, factores del cultivo en estado sólido tales como la materia prima empleada como sustrato, el microorganismo utilizado como cultivo iniciador y las condiciones de proceso que resultan en un mayor rendimiento según la bibliografía citada. Tal y como se ha podido comprobar en la presente revisión, la mayoría de las enzimas que se emplean en la industria alimentaria son sintetizadas por hongos del género *Aspergillus* (Jericó Santos et al., 2020) considerado el organismo modelo de producción de enzimas fúngicas. Además, se suelen emplear otro tipo de hongos endofíticos, tales como *Rhizopus spp.* y *Trichoderma spp.* También hay algunas referencias de enzimas producidas por levaduras probióticas, *Yarrowia lipolytica*, y por bacterias como *Bacillus subtilis*, *Bacillus velezensis*, *Lysinibacillus spp.*, *Serratia marcescens* o *Streptomyces spp.* Cabe destacar que las materias primas son diferentes dependiendo del tipo de microorganismo. Por ejemplo, los sustratos más comunes para los hongos y levaduras son la harina de soja o de cualquier otro cereal, mientras que para las bacterias son utilizados las pieles de frutas como la banana y los cítricos. En muchos casos, se acondiciona el sustrato mediante la aplicación de tratamientos de triturado y secado con aire caliente, previos a la fermentación. Estas etapas proporcionan un tamaño de partícula y una actividad del agua más favorables para el crecimiento microbiano y, en consecuencia, para la adecuada producción del metabolito de interés. Por un lado, el triturado rompe las estructuras contribuyendo a que el secado sea más rápido y a la liberación de nutrientes, haciendo que estos sean más fácilmente accesibles. Por otro lado, el secado es importante para estabilizar la materia prima y concentrar los nutrientes (Badui, 2006). Otros parámetros como la temperatura, el tiempo, la cantidad de inóculo, la humedad y el pH afectan notablemente el rendimiento del proceso de fermentación en estado sólido (Martínez-Vera & Mendoza-Camejo, 2018; Naik et al., 2019).

La SSF también se aplica con éxito a la producción de otros metabolitos de interés tales como compuestos aromáticos, colorantes o conservantes (tabla 3). Entre los



compuestos aromáticos destacan el 2-feniletano y el acetato de 2-fenetilo que intervienen en la bioconversión de L-fenilalanina en compuestos aromáticos con olor a rosa (Martínez et al., 2018); alcoholes aldehídos y cetonas, de intenso aroma afrutado (Martínez et al., 2017) y la δ -lactona 6 pentil- α -pirona insaturada apreciada por su aroma a coco (Fadel et al., 2015). Por otro lado, se encuentran los conservantes como la astaxantina, pigmento carotenoide de color rojo-amarillo empleado como conservante en la encapsulación de aceites por su elevada actividad antioxidante (Dursun et al., 2016); el ácido cítrico que además de usarse como potenciador del sabor previene reacciones de oxidación (Ali et al., 2016) y el ácido láctico. También, se puede destacar la monascorrubina como colorante natural (Zahan et al., 2020). Otro metabolito de interés es el ácido γ -linolénico que se usa comúnmente como suplemento alimenticio por tratarse de un ácido graso esencial omega-6 (Certik et al., 2016).

Por citar algunos ejemplos, en el estudio realizado por Ali et al. (2016) se evaluó el efecto de la temperatura (entre 20 y 40 °C), el tiempo de fermentación (entre 2 y 6 días), la humedad del medio (entre 50 y 80%) y la suplementación con aminoácidos esenciales (arginina, glicina, glutamina, tirosina y ácido aspártico) sobre la producción de ácido cítrico mediante la fermentación de bagazo de manzana y cáscara de cacahuete con *Aspergillus ornatus* y/o *Alternaria alternata*, concluyéndose que el co-cultivo de ambos microorganismos en presencia de bagazo de manzana a pH 5, 50% de humedad y 30 °C durante 48 h en presencia de arginina resulta en una mayor producción de ácido cítrico.

Por otro lado, Certik et al. (2012) evaluaron el empleo de diversos microorganismos oleaginosos (*Cunninghamella*, *Mortierella*, *Mucor*, *Rhizopus*, and *Thamnidium*) para producir ácido gamma-linolénico (GLA). Se trata de microorganismos que presentan características favorables para su uso industrial tales como estabilidad genética, no ser patógenos ni perjudiciales para la salud y, para esta aplicación en particular, ser capaces de acumular elevadas cantidades de lípidos. Para esta aplicación fue necesario suplementar el medio con aceite de girasol y restringir otros nutrientes, especialmente el nitrógeno. Entre los microorganismos ensayados, *T. elegans* presentó una capacidad más elevada para sintetizar GLA (20 g de GLA/g de sustrato seco), que se vio mejorada tras el enriquecimiento del sustrato con aceites vegetales y extractos de plantas.

Por su parte Vidhyalakshimi et al. (2012) evaluaron el efecto del tipo de cepa (*Xanthomonas spp.*) y el tipo de residuo vegetal (pieles de hortalizas como patata y cáscaras de frutas, cítricos o plátano) sobre la producción del exopolisacárido goma xantana y comprobaron que la suplementación del sustrato con fuentes de carbono y/o nitrógeno permite un aumento en el rendimiento del proceso. De forma similar, en el estudio realizado por Martínez et al. (2017) la suplementación del bagazo de caña de azúcar con un 25% (p/p) de pulpa de remolacha azucarera aumentó la producción de compuestos aromáticos desde 70 hasta 105 mg/g de sustrato por parte de la levadura *Kluyveromyces marxianus*.

Tabla 2. Microorganismos, sustratos y condiciones más adecuadas para la obtención de enzimas por SSF de residuos vegetales.

| Enzima | Microorganismo | Sustrato | Condiciones de fermentación | Productividad | Referencia |
|------------------|--|---|---|--|---------------------------------------|
| Celulasa | <i>Streptomyces</i> DSK29 | Salvado de arroz, salvado de trigo, cáscara de sorgo, cáscara de bengala o cáscara de maíz, triturado hasta 2-10 mm de diámetro, diluido hasta una humedad del 65% y esterilizado (121 °C-15 min) | 30 a 50 °C – 24 a 120 h Humedad = 50 a 70%; pH = 7 10 ⁵ - 10 ⁹ esporas/g sustrato | Máxima actividad enzimática (44 U ⁽¹⁾ /g _{ss} ⁽²⁾) a 45 °C, con una humedad del 65%, a pH 7 y 10 ⁸ esporas/g sustrato tras fermentar sorgo durante 96 h | Budihal & Agsar (2015) |
| Tanasa | <i>Aspergillus niger</i> PN1 | Salvado de arroz, residuo cervecero, posos de café o residuo de coco, secado con aire a 50 °C hasta una humedad < 5% y posteriormente rehidratado con agua estéril | 32 °C – 15 días Humedad = 50% 10 ⁸ esporas/g sustrato | Máxima actividad enzimática al fermentar salvado de arroz (148,7 U/g de ss) y residuo cervecero (140,8 U/g _{ss}) durante 15 días | Mansor et al. (2019) |
| | <i>Bacillus velezensis</i> TA3 | Cáscara de granada deshidratada y triturada (2-3 mm), suplementada con ácido tánico (0,1-0,5%), carbono (glucosa, xilosa, maltosa, almidón y sacarosa al 0,5%) y sales minerales (MgSO ₄ , NaH ₂ PO ₄ , CaCl ₂ ·2H ₂ O y KCl) al 0,02-0,1% | 37 °C – 48 h Humedad = 72%; pH = 7 5% (p/p) de inóculo | Mayor producción (32 U/g) tras 57 h de fermentación con una humedad del 72,5% y un contenido de ácido tánico del 0,68% | Lekshmi et al. (2020) |
| α-amilasa | <i>Bacillus sp.</i> y <i>Trichoderma harzianum</i> | Cáscaras de banana lavadas, secadas a 70 °C durante 24 h y molidas a un tamaño de 250 μm | 30 a 40 °C – 24 a 72h pH = 6 a 8 10 ⁷ UFC/g de <i>Bacillus sp.</i> y 10 ⁶ UFC/g de <i>Trichoderma harzianum</i> | Mayor producción (8,13 U/g _{ss}) tras 24 h a 35 °C y un pH de 7 | Martinez-Vera & Mendoza-Camejo (2018) |
| Lacasa | <i>Lysinbacillus sp.</i> | Salvado de trigo suplementado con harina de soja o restos de tofu (0-0,3g/g), cáscaras de cítricos en polvo (0-0,1 g/g), monómeros de lignina (0-0,004g/g), vino (0-10g/g, cáscaras de cebolla y kiwi (0-0,005 g/g), posos de café (0-0,01g/g), salvado y paja de trigo y arroz (0-0,005 g/g) o con hojas de té usadas (0-0,01 g/g) | 37 °C – 72 h Humedad ≥ 95%; pH = 5 0,5 mL de caldo de inóculo/5 g salvado de trigo | Mejores resultados al suplementar con 0,2 g/g de harina de soja (1088 nkats ⁽³⁾ /g), 0,005 g/g de polvo de piel de naranja (495 nkats/g), 0,002 g/g de ácido gálico (332,5 nkats/g), 0,005 g/g de Nescafé (230,5 nkats/g) y 0,002 g/g de paja de arroz (78 nkats/g) | Sharma et al. (2017) |
| Lipasa | <i>Yarrowia lipolytica</i> IMUFRJ 50682 | Cáscara de soja molida y tamizada (tamaño 0,5-1,18 mm), suplementada con 34 g glucosa:66 g aceite de soja | 27 a 35 °C – 3 a 15 h Humedad = 40-60%; pH = 7 0,71 mg inóculo/g sustrato | Mayor producción (1,2 U/g _{ss}) tras 15 h de fermentación a 28 °C y humedad del 55% | Do Nascimento et al. (2021) |



| | | | | | |
|--------------------------|--------------------------------------|---|--|--|-----------------------------------|
| Proteasa | <i>Aspergillus niger</i> LBA 02 | Salvado de trigo, harina de soja, harina de semillas de algodón y piel de naranja en 6 niveles (0%, 12.5%, 25%, 50%, 62.5% y 100%) diluido en agua | 30 °C – 24, 48, 72 y 96 h Humedad = 50% 10 ⁷ esporas /g sustrato | Máxima actividad enzimática (262,7 U/g _{ss}) tras 48 h | Soares de Castro et al. (2015) |
| | <i>Aspergillus oryzae</i> | Harina de soja previamente sobrecalentada, enriquecida con fuente de carbono y posterior esterilización (121 °C 15 min) | 37 °C – 11 días Humedad = 30, 40 50 y 60% pH = 6,5-8 10 ⁷ esporas/g sustrato | Actividad enzimática mayor con un tamaño de partícula de 0,2 mm (1283 U/g _{ss}), pH 7,4 (1281 U/g _{ss}), 45% de humedad (1254 U/g _{ss}) y 96 h de fermentación (1387,6 U/g _{ss}) | Thakur et al. (2015) |
| Pululanasa | <i>Aspergillus sp.</i> BHU-46 | Salvado de trigo y arroz, bagazo de caña de azúcar, cáscara de naranja, cáscara de <i>Citrus limetta</i> y cáscara de plátano suplementados con sales (1% (NH ₄) ₂ SO ₄ , 1% KH ₂ PO ₄ , 0,2% NaCl y 0,2% MgSO ₄) y esterilizados | 25 a 75 °C – 1 a 5 días Humedad = 50 a 70% pH = 5 a 7,5 Tamaño inóculo = 10 ⁴ a 10 ⁹ esporas/g sustrato | Mayor actividad enzimática (65,33 U/g _{ss}) con salvado de trigo, 27 °C, 72 h de fermentación, 70% de humedad, pH 6 y 10 ⁷ esporas/g | Naik et al. (2019) |
| Quitosanasa | <i>Trichoderma koningii</i> | Mezcla de salvado de trigo (3,5 ó 7 g), quitosano (0,5, 1 y 1,5 g y agua (1,5, 2,5 y 3,5 mL) estéril (121 °C-15min) | 30 °C – 48 y 72h pH = 4,5-6,5 10 ⁷ esporas | Mayor actividad enzimática (4,84 U/g _{ss}), mezclando 3 g de quitosano, 1,5 g de salvado de trigo, 2,5 mL de agua y 2,5 mL de disolución salina (pH 5,5) | Da Silva et al. (2012) |
| Elagitanasa | <i>Aspergillus niger</i> GH1 | Bagazo de caña de azúcar, mazorcas de maíz, cáscara de coco y tallos de candelilla previamente troceados y secados a 60 °C durante 24-48 h | 30 °C – 32 h Humedad = 40%; pH = 6,5 10 ⁷ esporas/g _{ss} | Mayor productividad (2,5 U/mg _{ss}) en mazorcas de maíz | Buenrostro-Figueroa et al. (2014) |
| Levansacarasa | <i>Bacillus subtilis</i> NRC1 | Altramuz, salvado de trigo, harina de sémola, paja de arroz, almidón, harina común y harina de maíz humedecidos con 10 mL de medio mineral y 1 L de agua destilada y esterilizados (121 °C-20 min) | 37 °C – 24 h Humedad = 50-100% pH = 6-8 1,2 x 10 ⁶ UFC/g sustrato | Mayor actividad enzimática con almidón (170 U/g _{ss}) | Eswy et al. (2013) |
| Poligalacturonasa | <i>Aspergillus sojae</i> ATCC 20235 | Salvado de trigo tamizado a un tamaño de partícula de 150-250 µm | 37 °C – 4 días Humedad = 70%, pH = 6 10 ⁷ esporas/g sustrato | Actividad enzimática de 298 U/g _{ss} | Demir & Tari (2016) |
| L-asparaginasa | <i>Serratia marcescens</i> NCIM 2919 | Torta de aceite de coco, torta de aceite de algodón, torta de aceite de cacahuete | 25 a 45 °C – 96 h Humedad = 30-70%; pH = 6-8 2 mL de caldo de inóculo | Mayor actividad enzimática (5,75 U/g _{ss}) con torta de aceite de coco, 30 °C, 40% de humedad y pH 7 | Ghosh et al. (2013) |

| | | | | | |
|----------------------|--|---|---|---|-----------------------|
| L-glutaminasa | Bacterias Ácido Lácticas AR-glut 5, AR-glut 6, AR-glut 7 | Polvos de residuos de té descafeinado y de fibra de coco suplementados con dihidrogenofosfato de potasio (1-4%), iones metálicos (Mg^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} y Fe^{2+}) al 0,03% o suero de leche (2 mL/g) | 25-45 °C – 24-72 h pH = 5,5-9 1-3 mL de caldo/g de sustrato | Mejores resultados (150 IU/g _{ss}) con polvos de residuos de té descafeinado y la cepa AR-glut 7 a pH 7,4, 37 °C, 2 mL de caldo/g, 0,03% de Mn^{2+} y 4% de dihidrogenofosfato de potasio | Jesuraj et al. (2013) |
| Invertasa | <i>Aspergillus niger</i> GH1 | Melaza y bagazo de caña de azúcar hidrolizado con ácido sulfúrico concentrado 1 h | 30 °C-72 h Humedad =70% 10^7 esporas/g sustrato | Actividad enzimática de 390 U/mg _{ss} | Veana et al. (2014) |

(1) U: Unidad enzimática; actividad catalítica responsable de la transformación de un μ mol de sustrato por minuto en condiciones óptimas de la enzima

(2) ss: sustrato seco

(3)nkat: número de moles de sustrato convertidos por segundo y mL de enzima

Tabla 3. Microorganismos, sustratos y condiciones más adecuadas para la obtención de compuestos químicos específicos por SSF de residuos vegetales.

| Compuesto químico | Microorganismo | Sustrato | Condiciones de fermentación | Productividad | Referencia |
|---|--|--|---|---|-----------------------------|
| Monascorrubina | <i>Penicillium minioluteum</i> ED24 | Torta de semillas de sésamo previamente secadas 14 h a 60 °C y molidas hasta 24-90 μ m y estériles (121 °C -20 min) | 25 a 30 °C – 14 días Humedad = 60-90%; pH = 5,5 10^8 esporas/g sustrato | Mayor rendimiento (4,25 g/g _{ss}) a 30 °C con un 60% de humedad | Zahan et al. (2020) |
| 2-feniletanol (2-PE) acetato de 2-fenetilo (2-PEA) | <i>Kluyveromyces marxianus</i> ATCC 10022 | Bagazo de caña de azúcar secado 24 h a 60 °C y molido (0,5-32 mm), disuelto con una solución mineral 0,1 M y estéril (121 °C-20 min) | 30 °C – 72 h Humedad = 66%; pH = 4,8 3% en base seca de L-fenilalanina 10^8 esporas/g sustrato | Producción máxima: 18,4 mg/g _{ss} | Martínez et al. (2018) |
| Goma Xantana | <i>Xanthomonas citri</i> <i>Xanthomonas oryzae</i> <i>Xanthomonas campestris</i> | Peladura de patata previamente triturada y humectada con 20 mL de agua y esterilizada | 28 °C – 6 días pH = 7,2 | Máxima con <i>Xanthomonas campestris</i> (2,9 mg/g _{ss}) | Vidhyalakshmi et al. (2012) |



| | | | | | |
|--|---|---|--|---|------------------------|
| Astaxantina | <i>Yamadazyma guilliermondii</i> <i>Yarrowia lipolytica</i> <i>Xanthophyllomyces dendrorhous</i> <i>Sporidiobolus salmonicolor</i> | Residuos de trigo tamizados (tamaño de 0,85 mm) | 18 a 25 °C – 12 a 15 días Humedad = 60-90% pH = 5-6 10 ⁶ esporas/g sustrato | Rendimiento máximo con <i>X. dendrorhous</i> con unas condiciones de 20 °C, un 90% de humedad y pH de 5,5 | Dursun & Dalgiç (2016) |
| Ácido cítrico | <i>Aspergillus ornatus</i> , <i>Alternaria alternata</i> y co-cultivo de ambos | Cáscaras de cacahuete y bagazo de manzana lavados con agua caliente, secados a 60 °C y triturados (40 mm) | 20 a 40 °C – 48 a 144h Humedad = 50-80% pH = 3 a 7 Suplementación enzimática 5 mL suspensión/g _{ss} | Rendimiento máximo (2,6 ± 0,9 mg/mL) tras fermentar bagazo de manzana (humedad = 50%) con el co-cultivo de ambos hongos a 30 °C durante 48 h en presencia de arginina | Ali et al. (2016) |
| Compuestos aromáticos: alcoholes, aldehídos y cetonas | <i>Kluyveromyces marxianus</i> ATCC 10022 | Bagazo de caña azucarera secado 24 h a 60 °C y molido (tamaño 0,5-32mm), disuelto con melaza de remolacha azucarera y tampón fosfato 0,1 M y estéril (121 °C-20 min) | 30 a 40 °C – 72h Humedad = 68%; pH = 5,3 10 ⁸ esporas/g sustrato | Producción máxima: 105 mg/g _{ss} | Martínez et al. (2017) |
| Ácido gama-linolénico | <i>Mortierella isabelina</i> <i>Cunninghamella echinutala</i> , <i>Cunninghamella elegans</i> , <i>Mucor rouxii</i> y <i>Thamnidium elegans</i> | <i>Mortierella isabelina</i> : cebada y orujo de manzana <i>Cunninghamella echinutala</i> : piel de naranja <i>Cunninghamella elegans</i> : cebada, harina de malta y aceite de cacahuete <i>Thamnidium elegans</i> : granos de espelta y malta, harina de maíz, de trigo, malta, aceite de girasol y extractos de plantas | 72 h | Rendimiento máximo (20 g GLA/g _{ss}) con <i>T. elegans</i> y sustrato enriquecido con aceites vegetales y extractos de plantas | Čertík et al. (2012) |
| δ-lactona 6-pentil-α-pirona insaturada | <i>Trichoderma viride</i> EMCC-107 | Bagazo de caña de azúcar secado 24 h a 60 °C, molido (tamaño de 1 mm) esterilizado (121 °C-20 min) | 3, 5, 7 y 12 días 1 mL de caldo de inóculo | Rendimiento máximo (3,62 mg/g _{ss}) a los 5 días de fermentación | Fadel et al. (2015) |
| Ácido láctico | <i>Rhizopus oryzae</i> | Residuos sólidos de piña previamente secados a 60 °C y tamizados (0,5 a 3,15 mm) | 27/40 °C – 7 días Humedad = 60-80% pH = 4,5-5,5 10 ⁴ – 10 ⁸ esporas/g sustrato | Rendimiento máximo (0,98 mg/g _{ss}) a 27 °C, 80% de humedad, pH de 6,5 y 10 ⁴ esporas/g | Aziman et al. (2015) |



3.3. LA FERMENTACIÓN EN ESTADO SÓLIDO PARA LA MEJORA DEL PERFIL NUTRICIONAL Y FUNCIONAL DE ALIMENTOS

Otra aplicación interesante de la fermentación en estado sólido, se basa en la transformación que experimentan los sustratos sobre los que se realiza la fermentación, ya que en muchas ocasiones se obtienen productos con mayores propiedades nutricionales que los hace interesantes como ingredientes o alimentos funcionales.

Entre las mejoras en el perfil nutricional asociadas a la fermentación de residuos vegetales cabe resaltar el aumento en la cantidad de compuestos con actividad antioxidante. El mecanismo principal por el que se produce este aumento en la capacidad antioxidante es la degradación de las paredes celulares por parte de las enzimas microbianas y la consiguiente liberación de compuestos fenólicos ligados a ellas (Gulsunoglu et al., 2020). A ello se une la producción de compuestos con actividad antioxidante por parte de los microorganismos implicados en el proceso de fermentación (Bei et al., 2017), y la transformación de unos compuestos antioxidantes en otros con mayor actividad (Bier et al., 2019). Adicionalmente, algunos microorganismos secretan proteasas que transforman las proteínas de alto peso molecular en otras de bajo peso con actividad antioxidante y habilidad de quelación de iones metálicos (Chi y Cho, 2016). A este respecto, son las especies del género *Bacillus* las principales productoras de proteasas, siendo *Bacillus subtilis* la más usada industrialmente (Paredes et al., 2017). La extracción de péptidos activos es también de gran importancia para la industria alimentaria, pudiendo ser un potencial nutracéutico y funcional, ya que protegen del daño oxidativo celular (Lorenzo et al., 2018).

En la tabla 4 se resumen los estudios revisados en los que la SSF de residuos de frutas, verduras, legumbres y cereales, empleando hongos y bacterias como cultivos iniciadores, da lugar a una mejora del perfil nutricional del sustrato fermentado debido a un aumento en contenido en compuestos fenólicos y otros compuestos con capacidad antioxidante. En el estudio realizado por Gulsunoglu et al. (2020), la fermentación de piel de manzana con hongos del género *Aspergillus spp.* redujo notablemente la concentración de quercetina y sus glicósidos a favor de la aparición de isómeros de erodictiol y catequina, permitiendo aumentar hasta 4 veces el contenido en fenoles y flavonoides totales y hasta 5 veces la actividad antioxidante. Por otro lado, Bier et al. (2019) constataron que la fermentación del bagazo y la piel de naranja secados y triturados con hongos endófitos del género *Diapotha* produjo la biotransformación de R-(+)-limoneno en limoneno-1,2-diol, α -terpineol y α -tocoferol, entre otros compuestos volátiles, lo que supuso un aumento en más de 8 veces en el contenido en fenoles totales. Además de por su elevada capacidad antioxidante, el producto obtenido resulta de gran interés por su empleo como aromatizante y saborizante. En el estudio de El-Katony et al. (2020) se demostró que el empleo de hongos ascomicetos (*Aspergillus fumigatus* y *Paecilomyces variotii*) aumentó el contenido en fenoles y flavonoides de la piel de granada, la actividad antioxidante de vainas de guisantes y paja de arroz y el contenido en enzimas con actividad antioxidante de piel de banana y cáscara de cítricos.

Tabla 4. Ejemplos de aplicación de la SSF a residuos de origen vegetal para el aumento del contenido fenólico y la mejora de la capacidad antioxidante.

| Sustrato | Microorganismos | Condiciones de fermentación | Resultados | Referencia |
|---|---|---|--|---------------------------------|
| Piel de manzana liofilizada, triturada y diluida en una proporción 1/5 (p/v) en agua destilada enriquecida con minerales | <i>Aspergillus aculeatus</i> ZGM6 <i>Aspergillus japonicus</i> ZGM4 <i>Aspergillus niger</i> ZDM2 <i>Aspergillus tubingensis</i> ZDM1 | 30 °C – 3 y 7 días pH inicial = 5,6 2·10 ⁶ esporas/g sustrato | Mejores resultados tras 7 días con <i>A. tubingensis</i> ZDM1 (1202 ± 88 mg EAG/100 g _{ms} , 495 ± 19 mg EC/100 g _{ms} y 2780 ± 161 mg ET/100 g _{ms}) y <i>A. niger</i> ZDM2 (1440 ± 37 mg EAG/100 g _{ms} , 382 ± 47 mg EC/100 g _{ms} y 3092 mg ET/100 g _{ms}) | Gulsunoglu <i>et al.</i> (2020) |
| Piel y bagazo de naranja secado a 60 °C, triturado, diluido en agua destilada hasta una humedad del 80% y esterilizado (121 °C – 15 min) | <i>Diaporthe spp.</i> | 30 °C – 7 días pH inicial = 4, 5 y 6 0,8-2 mm, 2-3 mm y mezcla 1/1 3, 5 y 7 mL/20 g sustrato | Mejores resultados a pH 6, mezcla 1/1 (p/p) de ambas granulometrías y 5 mL/20 g sustrato (de 36 mg EAG/g _{ms} a 271 mg EAG/g _{ms} y de 168,27 mg ET/g _{ms} a 538,05 mg ET/g _{ms}) | Bier <i>et al.</i> (2019) |
| Pieles de banana, granada y naranja, vainas de guisante y paja de arroz secadas a 50 °C, trituradas (≤ 1 mm), diluidas en agua destilada hasta un 90% de humedad y esterilizadas | <u>Basidiomicetos:</u> <i>Pleurotus columbinus</i> <i>Pleurotus floridanus</i> <u>Ascomicetos:</u> <i>Aspergillus fumigatus</i> <i>Paecilomyces variotii</i> | <u>Basidiomicetos:</u> 25 °C – 14 días <u>Ascomicetos:</u> 25 °C – 7 días 2 discos de cultivo/250 mL | Mayor producción de enzimas antioxidantes a partir de piel de naranja (catalasa y peroxidasa) y banana (catalasa), mayor producción de fenoles y flavonoides totales al fermentar piel de granada con hongos ascomicetos y mayor incremento en la actividad antioxidante al emplear como sustrato vainas de guisante y paja de arroz | El-Katony <i>et al.</i> (2020) |
| Residuos de piña y guayaba secados a 70 °C – 8 h, triturados (guayaba – 0.5 mm, piña – 0.7 mm), mezclados con harina de soja y disueltos con agua destilada hasta una humedad del 50% | <i>Rhizopus oligosporus</i> | 22 °C – 2 y 10 días Ratios fruta/soja: 1/1 y 9/1 (p/p) 10 ⁶ esporas/ 10 g sustrato | Mayor producción de fenoles para una ratio fruta/soja 1/1 (p/p) y 10 días, pero mayor incremento en la actividad antioxidante y en la capacidad anti- α -amilasa para una ratio 9/1 (p/p) y 2 días | Sousa & Correia (2012) |
| Harina de soja desgrasada y escaldada con vapor a 100 °C – 30 min | <i>B. amyloliquefaciens</i> U304 <i>L. acidophilus</i> <i>L. plantarum</i> <i>S. cerevisiae</i> CJ1697 | <i>Bacillus</i> : 37 °C – 24 h <i>Lactobacillus</i> : 37 °C – 36 h <i>Sacharomyces</i> : 30 °C – 48 h 10% p/v de inóculo | Mejores resultados (mayor degradación de rafiosa y estaquirosa y aumento en la actividad antioxidante y la capacidad quelante de iones debido al mayor contenido en fenoles totales y péptidos bioactivos) tras la fermentación con <i>B. amyloliquefaciens</i> U304 | Chi & Cho (2016) |
| Pasta de avena remojada (20 g), glicerina (1,6 g), extracto de levadura (0,4 g) y agua hasta una humedad del 60% esterilizada (115 °C – 30 min) | <i>Monascus anka</i> | 30 °C - 2, 4, 6, 8, 10, 12 y 14 días 10 ⁵ esporas/g de avena | El contenido en fenoles libres, ligados y conjugados aumentó durante los 14 días de fermentación; los fenoles libres, ligados y conjugados representan el 54%, 33% y 13% de los fenoles totales en el producto fermentado | Bei <i>et al.</i> (2017) |
| Harina de garbanzo liofilizado y molido a un tamaño de 0,2 mm | <i>Cordyceps militaris</i> SN-18 | 25 °C – 7 días 5 mL de caldo de cultivo/100 g de sustrato | Mejora del contenido fenólico, la composición proteica, los aminoácidos esenciales y la digestibilidad de la proteína, así como de la capacidad de interacción con agua y grasa | Xiao <i>et al.</i> (2015) |
| Torta de aceite de cacahuete lavada, secada, molida y remojada con medio Czapek 1/1 (p/v) | <i>Aspergillus awamori</i> MTCC 548 | 30 °C – 2, 3, 4, 5 y 6 días 10 ⁵ esporas/g | Aumento de los compuestos fenólicos y antioxidantes a las 120 h (87,35 μ M/g GAE), mejora del contenido mineral (Fe y Zn) y de propiedades funcionales como la capacidad de unión agua-aceite | Sadh <i>et al.</i> (2018) |



Esto último probablemente debido a la presencia de aceites esenciales o ácido cítrico en la corteza que previenen reacciones de oxidación. Sadh et al. (2018) reportaron una mejora significativa en las propiedades fenólicas y antioxidantes, además de una mejora en el contenido proteico y mineral y en las características morfológicas de la torta prensada de cacahuete mediante fermentación con el hongo *Aspergillus awamori*.

Por otro lado, Sousa & Correia (2012) evaluaron el efecto de la suplementación con harina de soja como fuente de carbono sobre el contenido fenólico, la actividad antioxidante y antiamilolítica de residuos de piña y guayaba fermentados con la cepa de calidad alimentaria *Rhizopus oligosporus*. Al no encontrarse una correlación entre el contenido en fenoles totales (que alcanzó valores máximos para una ratio fruta/soja de 1/1 (p/p) y 10 días de fermentación) y la capacidad para secuestrar al radical DPPH o para inhibir la enzima α -amilasa (que tomaron valores máximos para una ratio fruta/soja de 9/1 (p/p) y 2 días de fermentación), se pudo constatar que el efecto beneficioso para la salud asociado a los compuestos fenólicos no depende solo de la cantidad de sustrato, sino también del tipo. Durante la fermentación de harina de soja con diferentes microorganismos (*Bacillus amyloliquefaciens* U304, *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus plantarum* y *Saccaromyces cerevisiae* CJ1697), Chi & Cho (2016) comprobaron que con la bacteria ácido-láctica *B. amyloliquefaciens* U304 se consigue incrementar en mayor medida la actividad antioxidante debido no solo al aumento en la concentración de compuestos fenólicos, sino también al aumento en la cantidad de péptidos bioactivos. Además, debido a su capacidad para secretar amilasas y proteasas, tanto los niveles de rafinosa y estaquiosa como los inhibidores de tripsina se redujeron significativamente. Sin embargo, la fermentación con *S. cerevisiae* CJ1607 o con cualquiera de los otros lactobacilos solo tuvo efecto sobre unos u otros factores anti nutricionales, por lo que la mejora en la calidad nutricional y la bioactividad del sustrato resultó menor. Otro estudio que constata el incremento en la cantidad de fenoles y en la actividad antioxidante y que demuestra el papel de la fermentación en el desarrollo de nuevos ingredientes alimentarios saludables, es el llevado a cabo por Bei et al. (2017) sobre fermentación de avena con el hongo filamentoso *Monascus anka*. Los resultados obtenidos en este caso mostraron un aumento significativo en la cantidad de fenoles totales y específicos (catequina, rutina, ácido cafeico y ácido ferúlico), principalmente en la fracción libre, y la aparición de algunos compuestos fenólicos (quercetina y ácido clorogénico) tras 14 días de fermentación con el consiguiente aumento en la capacidad de secuestrar los radicales DPPH y ABTS+.

Otra mejora en el perfil nutricional resultado de la fermentación de residuos vegetales es el aumento en el contenido de proteínas de calidad y/o la mejora en la digestibilidad de las mismas. En la tabla 5 se muestran algunos ejemplos. Entre las materias primas empleadas como sustrato para alcanzar este propósito destacan derivados de leguminosas, especialmente el residuo resultante de la extracción de la fase hidrosoluble de la soja (*okara*) y las harinas de garbanzo, guisante, frijón, cacahuete, etc. Entre los microorganismos fermentadores es frecuente el empleo de bacterias



ácido-lácticas, tales como *Lactobacillus rhamnosus*, *Lactobacillus paracasei* o *Pediococcus spp.* Como levaduras destacan *Saccharomyces cerevisiae*, *Saccharomyces kluyveri* y *Kluyveromyces lactis*. Además, los hongos más comunes son *Rhizopus oryzae* y *Aspergillus oryzae*, seleccionados por su actividad β -glucosidasa (responsable de la hidrólisis de los glucósidos de isoflavonas de baja disponibilidad en agliconas bioactivas), su actividad fitasa (implicada en la hidrólisis del ácido fítico y en la liberación de minerales esenciales), y/o su actividad proteolítica (que permite transformar las proteínas en aminoácidos libres y péptidos bioactivos fácilmente asimilables).

Algunas de estas transformaciones se ven favorecidas por la reducción en el pH del medio debido a la producción de ácido láctico por parte de bacterias ácido-lácticas (Queiroz-Santos et al., 2018; Correa Deza et al., 2019 y Rodríguez de Olmos & Selva Garro, 2020). Cobaxin (2011) estudió la influencia de diferentes tipos de bacterias ácido-lácticas, levaduras y hongos sobre la calidad nutricional de la pasta de soja concluyendo que *S. kluyveri* mejoró la cantidad de isoflavonas (genisteína y daidzeína, con valores de 859 y 792,55 $\mu\text{g/g}$ de sustrato, respectivamente) y que *K. lactis* disminuyó la cantidad de ácido fítico de 1,81 a 1,43 g/g de sustrato. Xing et al. (2020) evaluaron la fermentación espontánea de la harina de garbanzo mediante distintas cepas de *Pediococcus spp.* obteniendo como resultado un aumento del 7,8% al 13,7% en el contenido proteico, un aumento de 6,9 a 15 mg de GAE/ g sustrato en el contenido en compuestos fenólicos y una disminución de factores anti nutricionales de 1,07 hasta 0,8 mg de ácido fítico/ g de sustrato. Queiroz-Santos et al. (2018) se interesaron por el efecto del pretratamiento térmico del sustrato sobre la calidad nutricional de la pasta de soja. En su estudio se constata una mayor producción de compuestos fenólicos a partir del sustrato tratado a 121 °C durante 15 min (de 74 mg GAE/10 g a 123 mg de GAE/10 g) que del sustrato sin tratar (de 88 mg de GAE/10 g a 116 mg de GAE/10 g), lo que implica un mayor incremento en su capacidad para secuestrar el radical DPPH. Sin embargo, la okara fresca fermentada experimentó un incremento en el contenido proteico del 23,5% frente al 11% experimentado por la tratada térmicamente. En estos casos, el aumento se debe al contenido en proteína unicelular contenida en los propios microorganismos (bacterias, mohos o algas), en los que llega a representar hasta más del 40% del peso seco. Levaduras y bacterias son particularmente importantes para la producción de este tipo de proteínas, pues su biomasa ha sido consumida por el hombre desde la antigüedad en forma de alimentos fermentados.

La producción de proteína unicelular mediante SSF suele emplearse con el fin de incrementar el contenido proteico de sustratos que no destacan por ser especialmente ricos en este nutriente. Muniz et al. (2020) constataron un aumento de hasta 11 veces en el contenido en proteína de pieles de guayaba y bagazo de anacardo incrementando tras la fermentación durante 6 horas con la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. El posterior empleo de residuos fermentados en la formulación de barritas de cereales resultó en un producto con un aporte proteico similar al control formulado con avena y bastante bien valorado por el panel de catadores. Esta misma levadura incrementó en



un 157%, 98% y 82% el contenido en proteína del bagazo de pomelo, piel de banana y vainas de mezquite respectivamente (Rompato & Somoza, 2015). En este caso, el co-cultivo de *Saccharomyces cerevisiae* y *Bacillus subtilis* no mejoró significativamente la concentración de proteína alcanzada en cada sustrato, aunque ofrece un beneficio adicional basado en su potencial probiótico.

3.4. LA FERMENTACIÓN EN ESTADO SÓLIDO PARA LA OBTENCIÓN DE EXTRACTOS CON PROPIEDADES ANTIOXIDANTES

Los compuestos antioxidantes tienen interés y aplicación más allá de su consumo directo en alimentos. Por este motivo, la SSF puede emplearse con la finalidad particular de producir compuestos antioxidantes para luego ser recuperados del medio de cultivo y utilizados fuera de éste. En la tabla 6 se muestran algunos ejemplos de los últimos estudios publicados en los que las SSF se aplica a residuos vegetales con el objetivo de obtener extractos con una elevada concentración de compuestos antioxidantes. En este caso, los residuos empleados como sustratos incluyen en mayor proporción partes no comestibles o habitualmente no consumidas tales como pepitas, cáscaras, paja, vainas; a diferencia de la aplicación discutida en el apartado anterior. Entre los sustratos más empleados se encuentran algunos a base de cereales, tales como salvado de arroz y de trigo, mazorcas y harina de maíz (Chandra et al., 2016; Jiang et al., 2020 y Klempová et al., 2020), también semillas y harina de arroz (Sadh et al., 2017), legumbres, entre ellas las cáscaras y semillas de tamarindo (Jericó-Santos et al., 2020) o la harina de lentejas (Torino et al., 2013), así como residuos procedentes del procesado de frutas y verduras, como semillas de mango (Torres-León et al., 2019), bagazo de caña de azúcar (Chandra et al., 2016), uva deshidratada, orujo de manzana y cáscara de pitaya (Zambrano et al., 2018) o subproductos del procesado industrial de piña (Rashad et al., 2015).

En cuanto al microorganismo empleado, destacan los hongos filamentosos endofíticos, pero también es común el empleo de bacterias y levaduras. Los géneros más comunes son *Aspergillus spp.*, *Mucor spp.*, *Penicillium spp.* y *Rhizomucor spp.*, pertenecientes a la familia *Mucoraceae*, orden *Mucorales* y clase *Zygomycetes*. Hongos del género *Aspergillus spp.* destacan por algunas características ya apuntadas en esta revisión tales como su gran adaptación a las condiciones de SSF o ser microorganismos GRAS), pero también por su capacidad de sintetizar más de 19 tipos de enzimas, entre ellas celulasas, pectinasas y proteasas, que promueven la liberación de compuestos fenólicos de la matriz sólida (Jericó Santos et al., 2020), además de producir nuevos compuestos bioactivos con capacidad antioxidante. Por otro lado, levaduras como *Kluyveromyces marxianus* o bacterias ácido-lácticas como *Bacillus subtilis* y *Lactobacillus casei*, también pueden emplearse para la obtención de dichos compuestos. Resaltar la actividad antioxidante de estas últimas, y su poder de preservación, debido a la habilidad de producir metabolitos antimicrobianos como los ácidos orgánicos (López et al., 2013).

La mayor parte de estudios revisados se centran en evaluar el efecto de las variables de proceso, especialmente el tipo de sustrato y de microorganismo, pero también



temperatura, tiempo, humedad, pretratamiento del sustrato y adición de fuente de carbono o nitrógeno, sobre el rendimiento del proceso. En la tabla 6 se muestran las condiciones de fermentación para diferentes combinaciones sustrato-microorganismo, que resultan en extractos fenólicos de elevada actividad antioxidante.

La suplementación del sustrato con fuentes de carbono y/o nitrógeno es una variable a destacar puesto que proporcionan nutrientes que permiten al microorganismo crecer en mayor proporción y más rápidamente, liberan más antioxidantes de las estructuras o favorecen la conversión de unos antioxidantes en otros con mayor actividad. El pretratamiento del sustrato es otro de los parámetros importantes para lograr un alto rendimiento fenólico durante la fermentación puesto que determina tanto en el crecimiento de los microorganismos, como la estabilidad del sustrato y los compuestos fenólicos. No obstante, provocar un excesivo estrés al microorganismo puede causar la pérdida de fenoles libres durante la fermentación.

Zambrano et al. (2018) evaluaron la posibilidad de obtener compuestos fenólicos bioactivos con gran capacidad antioxidante aplicando dos tipos de pretratamiento (secado por aire caliente y liofilización) a tres sustratos distintos: piel, raspón y semillas de uva resultantes del prensado del jugo y corazones, pedúnculos y semillas de manzana y pitahaya. Todos los sustratos fueron deshidratados y molidos a un tamaño de partícula de 3 mm. Se ha reportado que la intensidad del triturado puede afectar a la liberación de los compuestos bioactivos de la matriz. Del estudio se concluye que la liofilización de los subproductos de uva dio lugar a una mayor producción de compuestos fenólicos (1956 mg GAE/100 g sustrato seco) que el secado con aire caliente (1385 mg GAE/100 g sustrato seco), debido a un aumento en la actividad de la enzima β -glucosidasa y disminución de la rigidez del tejido vegetal. Además de para la obtención de compuestos fenólicos, la SSF también se aplica con intención de obtener otros productos con propiedades antioxidantes, tales como péptidos bioactivos, ácidos grasos poliinsaturados o carotenos.

El empleo de distintos disolventes de extracción, también determina el rendimiento en compuestos antioxidantes. La polaridad de los disolventes juega un papel fundamental, puesto que incrementa la solubilidad de los compuestos fenólicos. Alves-Magro et al. (2020) ensayaron distintos disolventes (agua, metanol, acetato de colina, hidróxido de colina y lactato de colina) para determinar su efecto sobre el rendimiento fenólico de extractos de lenteja tras la SSF. Los autores concluyeron que el agua, el metanol y el lactato de colina aumentaron de forma significativa el contenido de fenoles totales durante la fermentación, siendo este último el mejor disolvente de extracción dando lugar a 6,57 mg de GAE/g_{sustrato seco}, frente a aproximadamente 4 y 2 mg de GAE/g_{ss} que consiguieron con el agua y metanol, respectivamente.

Tabla 5. Ejemplos de aplicación de la SSF a residuos de origen vegetal para el aumento del contenido proteico, la eliminación de factores antinutricionales y/o la mejora de la digestibilidad

| Sustrato | Microorganismo | Condiciones de fermentación | Resultados | Referencia |
|--|--|--|--|---|
| Mezcla de soja y agua en relación 1:1 (p/p), con o sin adición de un 1% (p/p) de sacarosa | <i>Lactobacillus rhamnosus</i> CRL 981 | 37°C – 24 h de fermentación Humedad = 80% 9,69 log UFC/ g sustrato | Enriquecimiento de isoflavonas (50 mg/22 g de producto final) y de aminoácidos libres y más digeribles (30,1 μmol/g sustrato) tras 12 h | Correa Deza et al. (2019) |
| Mezcla de soja y agua destilada. Esterilización 118 °C-20 min | <i>Lactobacillus paracasei subsp. paracasei</i> CRL 207 | 31, 33, 37, 41, 43 °C – 24 h Humedad = 50-80% 7,9 x 10 ⁷ UFC/g sustrato | Enriquecimiento de isoflavonas (41 mg/50 g sustrato), de aminoácidos libres (31 μg/g sustrato) y de ácidos orgánicos (143 μmol/g sustrato) a 37 °C y 65% de humedad | Rodríguez de Olmos & Selva Garro (2020) |
| Semillas de soja lavadas y cocinadas en solución bicarbonato 0,25% (p/v) y homogeneizadas con 1,80 L de agua potable | <i>Saccharomyces cerevisiae</i> | 28 °C – 72 h 10 ⁶ células/g sustrato | Aumento calidad nutricional: proteínas (40,5g/100g sustrato) fibra cruda dando mayor digestibilidad (14g/100g sustrato), fenoles (123mg GAE/100g de sustrato), actividad antioxidante (24,4mmol eq Trolox/g sustrato) y de isoflavonas | Queiroz-Santos et al. (2018) |
| Mezcla de harina de soja y agua destilada en relación 1:2 (p/v) | <i>L. plantarum</i> CDBB-B-1091; <i>L. rhamnosus</i> CDBB-B-795; <i>Kluyveromyces lactis</i> 44; <i>S. kluyveri</i> CDBB-L-716 | 25 °C – 24, 48, 72, 96, 120 h 10 ⁸ UFC/g sustrato (bacterias) 10 ⁷ esporas/g sustrato (levaduras) | Incremento de isoflavonas (859 μg genisteína/g y 792,5 μg daidzeína/g) con <i>S. kluyveri</i> y disminución de factores antinutricionales (de 1,81 a 1,43 g/100 g) con <i>K. lactis</i> tras 120 h | Cobaxin (2011) |
| Pieles de guayaba y bagazo de anacardo secados a 55°C, triturados, esterilizados (121°C 15 min) y mezclados con agua destilada hasta humedad del 70% | <i>Saccharomyces cerevisiae</i> | 30 °C – 1, 3, 6 y 9 h Inóculo: anacardo 3% (p/v) y guayaba 5% (p/v) | Mayor concentración en proteínas y fibra en bagazo de anacardo. Rendimiento proteína = 1,16 g proteína/g sustrato | Muniz et al. (2020) |
| Harina de garbanzo y sus fracciones proteicas y almidonosas mezcladas con agua en relación 2:1 (p/p) | Bacterias ácido-lácticas autóctonas: <i>Pediococcus spp.</i> | Fermentación espontánea a 37 °C – 24 h, 2,7 g de masa fermentada se mezclan diariamente 10,2 g de sustrato y 5,1 g de agua destilada 10 días | Incremento proteico (de 7,8 a 13,7%), eliminación de factores antinutricionales (de 1,07 a 0,8 mg ác. fítico/g) y aumento fenólico (de 6,9 a 15 mg GAE/g) | Xing et al. (2020) |
| Harina de semillas de guisante lavada, secada, remojada con medio Czapek (1/3 p/v), incubada 12 h a 25 °C y esterilizada | <i>Aspergillus oryzae</i> | 30 °C – 48, 72 y 96 h 10 ⁶ esporas/g sustrato | Mejora de la biodisponibilidad y digestibilidad de minerales como FE y Zn, aumento en la síntesis de ferritina lo que hace que el Fe esté más disponible. Mejora de propiedades funcionales (densidad aparente, capacidad de retención de agua y unión agua-aceite y capacidad estabilizante y emulsionante) | Chawla et al. (2017) |
| Bagazo de pomelo, piel de banana y vainas de mezquite secadas, trituradas, mezcladas con tampón 1/5 (p/v), esterilizadas (121°C 15 min) | <i>Saccaromyces cerevisiae</i> <i>Bacillus subtilis</i> <i>Simbiosis de levadura + bacteria</i> | 37 °C – 4, 8 y 16 días pH = 5-6 levadura: 8,2 log UFC/g sustrato bacteria: 12 log UFC/g sustrato | Enriquecimiento proteico microbiano a los 16 días de fermentación con la simbiosis de levadura y bacteria (de 13,5 a 16 g proteína/g sustrato) | Rompato & Somoza, 2015 |

| | | | | |
|---|--|---|---|-----------------------------|
| Residuos de mango: piel y semilla secadas 55°C 48h y molidas | <i>Saccharomyces cerevisiae</i> ; <i>S. boulardii</i> ; <i>Lactobacillus plantarum</i> ; <i>L. acidophilus</i> | 37°C – 6 días Humedad= 70%, pH= 3,4 10 ⁷ UFC/mL | Mejora contenido nutricional aumentando proteínas y minerales con <i>L. plantarum</i> y <i>S. boulardii</i> | Munishamanna et al. (2017) |
| Pieles de patata, residuos de manzana, pera y naranja, torta de pulpa de aceituna y posos de café | <i>Rhizopus oryzae</i> | 30 °C – 72 h 10 ⁶ UFC/mL Adición de nitrógeno (1,2%) | Aumento en la concentración de proteínas y ácidos grasos, además de aminoácidos esenciales como valina, isoleucina, leucina o arginina con residuos de frutas | Ibarruri & Hernández (2017) |
| Salvado de trigo previamente tamizado a 230-425µm y mezclado con 20mL de agua esterilizada | Simbiosis de bacteria ácido-láctica <i>Lactobacillus bulgaricus</i> y levadura <i>Streptococcus thermophiles</i> | 30 °C – 24 h Humedad = 50%, pH = 6 20 mL de caldo de inóculo | Mayor producción de arabinoxilanos extraíbles en agua (37,42mg/ g sustrato), aumento de aminoácidos esenciales (de 1,1 a 2,1 mg/g sustrato) y disminución del ácido fítico | Zhao et al. (2017) |
| Salvado de trigo, salvado de centeno, copos de avena, copos de cebada y grano de malta agotada humedecidas con 10mL de agua destilada | <i>Mucor pterinsularis</i> CCF-2409; <i>M. dimorphosporus</i> CCF-2583; <i>M. hiemalis</i> CCF-2698; <i>M. circinelloides</i> CCF-2617 | 25 °C – 14 días 2 mL de caldo de inóculo | Uso de <i>M. circinelloides</i> mejora el rendimiento de GLA y β-caroteno. Sustrato enriquecido con aceite de girasol mayor contenido de GLA (2,4%) y sustrato enriquecido con glucosa mayor β-caroteno (8,5 mg/g sustrato) | Milán et al. (2013) |

Tabla 6. Artículos resultantes de la obtención de extractos fenólicos con alta capacidad antioxidante y sus condiciones de proceso más relevantes

| Sustratos | Microorganismos | Disolvente | Condiciones de fermentación | Productividad | Referencia |
|--|--|---|--|--|-----------------------------|
| Harina de semilla y cáscara de tamarindo 1:1 (p/p) previamente secada (24 h, 50 °C) y triturada (0,01 mm). Adición de agua destilada, glucosa (50 g/L) y extracto de levadura (20 g/L). Esterilización (15 min-121 °C) | <i>Aspergillus niger</i> IOC 3677 | Agua destilada Solución acuosa de etanol 40% Solución acuosa etanol 80% | 30 °C – 24, 48, 72, 96, 168 h Humedad = 50, 60, 70 y 80% 2 x 10 ⁸ esporas/g sustrato | Máxima producción de compuestos fenólicos (de 2,065 a 5,467 g de GAE/100 g _{ss}) con un 70% de humedad y tras 72 h de fermentación con disolvente solución acuosa etanol 80% | Jericó-Santos et al. (2020) |
| Paja de trigo, paja de arroz, mazorca de maíz, vaina de guisante y bagazo de caña de azúcar | <i>Aspergillus fumigatus</i> ; <i>A. terreus</i> 1 y 2; <i>A. goingii</i> 1 y 2; <i>Penicillium citrinum</i> ; <i>P. granulatum</i> ; <i>P. expansum</i> | | 25 °C – 7 días | Máxima producción de compuestos fenólicos (de 7,8 a 20,4 mg GAE/mL) al fermentar bagazo de caña de azúcar con <i>A. terreus</i> 1 | Chandra & Arora (2016) |
| Semillas de mango previamente secadas a 60 °C y molidas con un tamaño de partícula > 600 µm | <i>Aspergillus niger</i> GH1 | Disolvente A: ácido fórmico 0,2% v/v Disolvente B: acetonitrilo | 30 °C – 10, 20, 30, 40, 50 y 60 h Humedad = 54%; pH = 4,4 2 x 10 ⁷ esporas/g sustrato | Aumento máximo del contenido fenólico total (de 984 a 3288 mg de GAE/g _{ss}) tras 20 h | Torres-León et al. (2019) |



| | | | | | |
|---|--|---|--|--|---------------------------------------|
| Semillas de lentejas previamente higienizadas, homogeneizadas, expuestas a luz UV durante 1 h y molidas hasta obtener harina | <i>Aspergillus oryzae</i> LB01 | Agua Metanol Acetato de colina Hidróxido de colina Lactato de colina | 30 °C – 24, 48, 72 y 96 h Humedad = 50% 10 ⁷ esporas/ g sustrato | Extractos acuosos tras 72 h de fermentación 5 veces más fenoles totales y un incremento del 143% en la inhibición del ABTS | Alves-Magro & Soares de Castro (2020) |
| Harina de hoja de moringa secada 4 h a 50 °C y triturada. | <i>Aspergillus niger</i> IOC 3677 | Acetonitrilo 98% Ácido fórmico 98% | 30 °C – 24, 48, 72, 96 y 168 h Humedad = 50 y 70% 1 a 4 x 10 ⁷ esporas/g sustrato | Mayor concentración de fenoles a las 24 h con 70% de humedad (de 1,66 a 3,93 g GAE/100 g _{ss}) | Buarque-Feitosa et al. (2020) |
| Semillas y harina de arroz humedecida con 50 mL de medio Czapek-dox y estéril (121 °C-15 min) | <i>Aspergillus awamori</i> MTCC 548; <i>A. oryzae</i> MTCC 3107 | Etanol Metanol Hexano | 30 °C – 2, 3, 4, 5 y 6 días 10 ⁶ esporas/g sustrato | Mayor contenido fenólico (281,67 µM GAE/100 g _{ss}) y actividad antioxidante (1120,17 µM de Vitamina C/100 g _{ss}) tras fermentar semillas de arroz con <i>A. awamori</i> durante 4 días | Sadh et al. (2017) |
| Uva negra (piel, raspón y semillas), manzana y pitahaya (cáscara, corazón, pedúnculo y semillas) previamente secadas 18 h a 65 °C o liofilizadas y molidas (3 mm) | <i>Rhizomucor miehei</i> NRRL 5282 | Disolvente A: H ₂ O y ácido acético relación 97:3 Disolvente B: Me CN y ácido acético relación 97:3 | 37 °C – 3, 5, 7, 10, 13, 15 y 18 días 5,8 x 10 ⁶ esporas/g sustrato | Mejor resultado en residuos liofilizados tras 15 días de fermentación: uva negra (1956 mg GAE /100 g _{ss}), manzana (477 mg de GAE/100 g _{ss}), pitahaya (495 mg GAE/100 g _{ss}) | Zambrano et al. (2018) |
| Residuos del procesado de piña (pulpa, cáscara, corona) secado a 60 °C y molido | <i>Kluyveromyces marxianus</i> NRRL Y-8281 | Cloroformo+ Agua oxigenada | 30 °C – 3 días 10 ⁸ esporas/g sustrato | Incremento del contenido fenólico de 112 a 120 mg GAE /100 g _{ss} | Rashad et al. (2015) |
| Lentejas partidas suspendidas en agua estéril 16 h a 6 °C y tratadas térmicamente (121 °C-15 min) | <i>Bacillus subtilis</i> CECT 39 | | 37 °C – 48 y 96 h Humedad = 90%; pH = 6,9 10 ⁵ UFC/g sustrato | Mayor incremento del contenido fenólico total (de 24 a 35 mg GAE/g _{ss}) y de la actividad antioxidante (de 0,17 a 0,24 mmol ET/g _{ss}) tras 96 h de fermentación | Torino et al. (2013) |
| Pulpa de café previamente secada 24 h a 60 °C hasta un 5% de humedad y pulverizada hasta 150 µm | <i>L. casei</i> , <i>L. acidophilus</i> , <i>L. thermophilus</i> , <i>L. paracasei</i> , <i>B. bifidum</i> , <i>B. lactis</i> , <i>B. longum</i> , <i>E. termophilus</i> | | 37 °C – 24 y 48 h Humedad = 70%; pH = 5 9,05 x 10 ⁶ UFC/g sustrato | Mayor liberación de compuestos fenólicos (de 10,2 a 12,3 mg GAE/g _{ss}) tras 48 h de fermentación con <i>L. casei</i> | López et al. (2013) |



4. CONCLUSIÓN

La fermentación en estado sólido (SSF) es una técnica verde que puede ser utilizada para la revalorización de residuos vegetales agroindustriales, contribuyendo así a la economía circular. Su aplicación a este tipo de sustratos va dirigida principalmente a la producción de compuestos químicos (aromas, pigmentos, etc.) o enzimas, la mejora del perfil nutricional y funcional y la obtención de extractos antioxidantes. Sin embargo, su rendimiento se ve notablemente afectado por las variables de proceso, especialmente el tipo de sustrato y de microorganismo, pero también temperatura, tiempo, humedad, pretratamiento del sustrato y adición de fuente de carbono o nitrógeno. Si bien el presente estudio ha permitido extraer algunas conclusiones parciales que se presentan a continuación, podemos decir que la SSF de cualquier residuo vegetal agroindustrial dirigida a una aplicación específica debe estudiarse considerando todas las variables de proceso.

Los sustratos más empleados para producir enzimas son los residuos lignocelulósicos (salvado de arroz, salvado de trigo, harina de soja, etc.) y destacan los hongos como microorganismos fermentadores. Además, la suplementación de estos sustratos con otros residuos como posos de café mejora el rendimiento del proceso.

Entre las mejoras en el perfil nutricional asociadas a la SSF de residuos vegetales cabe resaltar el aumento en la cantidad de compuestos con actividad antioxidante y la supresión de algún factor antinutricional, como es el caso del ácido fítico. Los sustratos más empleados en estos casos son los residuos de frutas (piel de banana, piña, manzana, etc.), cereales y legumbres (harina de soja, pasta de avena, etc.). En cuanto al tipo de microorganismo, destacan los hongos y ocasionalmente las bacterias ácido-lácticas.

Por último, para la obtención de extractos antioxidantes se suelen emplear residuos del procesado de frutas como materia prima y hongos y bacterias ácido-lácticas como cultivos iniciadores. El tipo de disolvente empleado en estos casos para la recuperación de los compuestos bioactivos sería otro factor a tener en cuenta para que el rendimiento del proceso fuera máximo.

5. BIBLIOGRAFÍA

Ahmed, Y. & Carlstrom, C. 2006. Microbiología de los alimentos: Manual de laboratorio. Editorial Acribia S.A.

Ali, S. et al. 2016. Biosynthesis of citric acid from single and co-culture based fermentation technology using agro-wastes. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 9(1), pp.57-62. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.09.003> >

Alves Magro, A. et al. 2020. Effects of solid-state fermentation and extraction solvents on the antioxidant properties of lentils. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 28, p. 101753. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101753> >

Arguedas-Gamboa, P. 2014. Definición del proceso de elaboración de bebida fermentada a partir de pulpa del café (broza). *Revista Tecnológica En Marcha*, 38. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.18845/tm.v0i0.1654> >



- Aziman, S. et al. 2015. Determination of lactic acid production by *Rhizopus oryzae* in solid state fermentation of pineapple waste. *Jurnal Teknologi*, 77(31). [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.11113/jt.v77.6917> >
- Badui, S. 2006. *Química de los alimentos* (4ª Edición). Pearson Educación. [en línea]. Disponible en: < <https://itscv.edu.ec/wp-content/uploads/2019/06/QUIMICA-DE-LOS-ALIMENTOS-4ta-Edicion.pdf> >
- Bei, Q. et al. 2017. Improving free, conjugated and bound phenolic fractions in fermented oats (*Avena sativa* L.) with *Monascus anka* and their antioxidant activity. *Journal of Functional Foods*, 32, pp.185-194. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.02.028> >
- Beltrán-Delgado, L. et al. 2019. Acoplamiento molecular de compuestos fenólicos de *Pleurotus ostreatus* con proteínas del balance redox. *Revista Cubana de Química*, 33 (3), pp. 336-353. [en línea]. Disponible en: < https://www.researchgate.net/publication/336676131_Acoplamiento_molecular_de_compuestos_fenolicos_de_Pleurotus_ostreatus_con_proteinas_del_balance_redox_Molecular_docking_of_Pleurotus_ostreatus_phenolic_compounds_with_redox_balance_proteins >
- Bier, M. et al. 2019. Evaluation of antioxidant activity of fermented product from the biotransformation of R-(+)- limonene in solid-state fermentation of orange waste by *Diaporthe* sp. *Biotechnology Research and Innovation*, 3(1), pp- 168-176. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.biori.2019.01.002> >
- Budihal, S. R. et al. 2015. Exploration of agrowastes for the production of cellulase by *Streptomyces* DSK29 under submerged and solid state systems. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 4(11), pp.681-689. [en línea]. Disponible en: < <https://www.ijcmas.com/vol-4-11/Saikumar%20R.%20Budihal%20and%20Dayanand%20Agsar.pdf> >
- Buenrostro-Figueroa, J. et al. 2014. Potential use of different agroindustrial by products as supports for fungal ellagitannase production under solid-state fermentation. *Food and Bioproducts Processing*, 92(4), pp. 376-382. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.08.010> >
- Carranco, M.E. et al. 2011. Carotenoides y su función antioxidante: Revisión. *Archivos Latinoamericanos de nutrición*, 61(3), pp. 233-241. [en línea]. Disponible en: < <https://www.alanrevista.org/ediciones/2011/3/art-1/> >
- Čertík et al. 2013. Simultaneous enrichment of cereals with polyunsaturated fatty acids and pigment by fungal solid state fermentations. *Journal of Biotechnology*, 168(2), pp. 130-134. [en línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2013.03.016> >
- Čertík, M. et al. 2012. Microbial production of γ -linolenic acid: submerged versus solid-state fermentations. *Food Science and Biotechnology*, 21(4), pp.921-926. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1007/s10068-012-0121-2> >
- Chandra, P. et al. 2016. Production of antioxidant bioactive phenolic compounds by solid- state fermentation on agro-residues using various fungi isolated from soil. *Asian Journal of Biotechnology*, 8(2), 8-15. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.3923/ajbkr.2016.8.15> >
- Chawla, P. et al. 2017. Impact of solid-state fermentación (*Spargillus oryzae*) on functional properties and mineral bioavailability of black eyed pea (*Vigna unguiculata*) seed flour. *Cereal Chemistry Journal*, 94(3), pp. 437-442. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1094/cchem-05-16-0128-r> >



Chi, C. et al. 2016. Improvement of bioactivity of soybean meal by solid-state fermentation with *Bacillus amyloliquefaciens* versus *Lactobacillus* spp. and *Saccharomyces cerevisiae*. *LWT-Food Science and Technology*, 68, pp. 619-625. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.12.002> >

Cobaxin, M. 2011. Mejoramiento de las características funcionales de una pasta de soya mediante fermentación. Tesis Final de Grado. Universidad de Veracruz, México. [en línea]. Disponible en: < <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/46928/CobaxinMarquezMayraJannet.pdf?sequence=1&isAllowed=y> >

Comisión Europea. 2020. Food 2030 pathways for action - Research and innovation policy as a driver for sustainable, healthy and inclusive food systems. Disponible en: < https://ec.europa.eu/info/publications/food-2030-pathways-action-research-and-innovation-policy-driver-sustainable-healthy-and-inclusive-food-systems_en >

Comunian, T., Silva, M. and Souza, C. 2021. The use of food by-products as a novel for functional food: Their use as ingredients and for the encapsulation process. *Trends in Food Science & Technology*, 108, pp. 269-280. [en línea]. Disponible en: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924224421000030> >

Correa, M. et al. 2019 Solid state fermentation to obtain vegetable products bio-enriched with isoflavone aglycones using lactic cultures. *Revista Argentina De Microbiología*, 51(3), pp. 201-207. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.ram.2018.04.006> >

Da Silva, L. et al. 2012. Optimization of chitosanase production by *Trichoderma koningii* sp. Under solid-state fermentation. *Food and Bioprocess Technology*, 5(5), pp.1564-1572. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0479-1> >

De Castro, R. et al. 2015. A versatile system based on substrate formulation using agroindustrial wastes for protease production by *Aspergillus niger* under solid state fermentation. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 4(4), pp. 678-684. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2015.08.010> >

Demir, H. et al. 2016. Bioconversion of wheat bran for polygalacturonase production by *Aspergillus sojae* in tray type solid-state fermentation. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 106, pp.60-66. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.10.011> >

Do Nascimento, F. et al. 2021. Insights into media supplementation in solid-state fermentation of soybean hulls by *Yarrowia lipolytica*: Impact on lipase production in tray and insulated packed-bed bioreactors. *Biochemical Engineering Journal*, 166, p.107866. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107866> >

Dursun, D. et al. 2016. Optimization of astaxanthin pigment bioprocessing by four different yeast species using wheat wastes. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 7, pp. 1-6. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2016.04.006> >

El-Katony, T. et al. 2020. Substrate-fungus interaction on the enzymatic and non-enzymatic antioxidant activities of solid state fermentation system. *Bioresources and Bioprocessing*, 7(1). [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1186/s40643-020-00316-8> >

Eswy, M. et al. 2013. Levansucrase optimization using solid state fermentation and levan biological activities studies. *Carbohydrate Polymers*, 96(1), pp.332-341. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.03.089> >



Fadel, H. et al. 2015. Characterization and evaluation of coconut aroma produced by *Trichoderma viride* EMCC-107 in solid state fermentation on sugarcane bagasse. *Electronic Journal of Biotechnology*, 18(1), pp.5-9. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2014.10.006> >

Feitosa, P. et al. 2020. Solid-state fermentation with *Aspergillus niger* for the bio-enrichment of bioactive compounds in *Moringa oleifera* (moringa) leaves. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 27, p. 101709. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101709> >

Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2021. Food Loss and Waster Database. [en línea]. Disponible en: < <https://www.fao.org/platform-food-loss-waste/flw-data/es/> >

Garmendia, M. 2021. Estimación de la generación de residuos y subproductos en la industria alimentaria en Navarra. Trabajo Final de Grado. Universidad Pública de Navarra. [en línea]. Disponible en: < <https://hdl.handle.net/2454/40350> >

Garrido, S. 2020. Potential of fermentation processes for nutritional and improvement for nutritional and improvement of cereals, legumes and seeds flours: a review. Trabajo Fin de Máster. Universidad Politécnica de Valencia. [en línea]. Disponible en: < <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/151478/Garrido%20-%20Potencial%20de%20los%20procesos%20de%20fermentaci%C3%B3n%20para%20la%20mejora%20nutricional%20y%20funcional%20de%20har....pdf?sequence=2> >

Ghosh, S. et al. 2013. Optimization of L-asparaginase production by *Serratia marcescens* (NCIM 2919) under solid state fermentation using coconut oil cake. *Sustainable Chemical Processes*, 1(1). [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1186/2043-7129-1-9> >

Grande Tovar, C.D. 2016. Valoración Biotecnológica de residuos agrícolas y agroindustriales. Editorial Bonaventuriana. [en línea]. Disponible en: < <http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/4588/1/9789588785813.pdf> >

Gulsunoglu, Z. et al. 2020. Enhancement of phenolic antioxidants in industrial apple wase by fermentation with *Aspergillus spp.* *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 25, p. 101562. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101562> >

Hesseltine, C.W. 1987. Solid state fermentation: an overview. *International Biodeterioration*, 23(2), pp. 79-89.

https://scholar.google.es/scholar?q=Bioprocessing+Of+Ar+Isolates+For+Economical+Production+Of+L+%E2%80%93+Glutaminase+By+Solid+State+Fermentation&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholar >

Ibaurri, J. et al. 2017. *Rhizopus oryzae* as fermentation agent in food derived sub-products. *Waste and Biomass Valorization*, 9(11), pp. 2107-2115. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0017-8> >

Jericó Santos, T. et al. 2020. Solid-state fermentation as a tool to enhance the polyphenolic compound contents of acidic *Tamarindus indica* by products. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 30, pp. 101851. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101851> >

Jericó Santos, T. et al. 2020. Solid-state fermentation as a tool to enhance the polyphenolic compound contents of acidic *Tamarindus indica* by-products. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 30, p. 101851. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101851> >

Krishna, C. 2005. Solid- state fermentation systems- an overview. *Critical Reviews in Biotechnology*, 25(1-2), pp. 1-30. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1080/07388550590925383> >



Lekshmi, R. et al. 2020. Pomegranate peel is a low-cost substrate for the production of tannase by *Bacillus velezensis* TA3 under solid state fermentation. Journal of King Saud University-Science, 32(3), pp.1821-1837. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.01.022> >

López, T. et al. 2013. Incremento de la capacidad antioxidante de extractos de pulpa de café por fermentación láctica en medio sólido. Cyta- Journal Of Food, 11(4), pp. 359-365, [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1080/19476337.2013.773563> >

Lorenzo, J. et al. 2018. Bioactive peptides as natural antioxidants in food products- A review. Trends in Food Science and Technology, 79, pp. 136-147. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.07.003> >

Mansor, A. et al. 2019. Evaluation of selected agri-industrial residues as potential substrates for enhanced tannase production via solid-state fermentation. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 20, p. 101216. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101216> >

Martínez, O. et al. 2017. Valorization of sugarcane bagasse and sugar beet molasses using *Kluyveromyces marxianus* for producing value-added aroma compounds via solid-state fermentation. Journal of Cleaner Production, 158, pp.8-17. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.155> >

Martínez, O. et al. 2018. Bioproduction of 2-phenylethanol and 2-phenethyl acetate by *Kluyveromyces marxianus* through the solid-state fermentation of sugarcane bagasse. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1007/s00253-018-8964-y> >

Mendoza, E.E. et al. 2018. Producción de alfa amilasa por fermentación en estado sólido de residuos agroindustriales (cáscaras de banano) utilizando *Bacillus subtilis*. Trabajo de Licenciatura. Universidad de Guayaquil (Ecuador). [en línea]. Disponible en: < <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/33219> >

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 2020. Informe del Desperdicio Alimentario en la Industria y la Distribución en España. [en línea]. Disponible en: < https://menosdesperdicio.es/sites/default/files/documentos/relacionados/informe_del_desperdicio_alimentario_en_la_industria_y_la_distribucion_en_espana.pdf >

Mitchell, D. et al. 2006. Solid-state fermentation bioreactor fundamentals. Berlin: Springer, 1-12. [en línea]. Disponible en: < <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F3-540-31286-2.pdf> >

Mor, P. 2021. Evaluación del impacto del proceso de fermentación en estado sólido con *Pleurotus ostreatus* en las propiedades de la quinoa. Trabajo final de grado. Universidad Politécnica de Valencia. [en línea] Disponible en: < <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/173636/Mor%20-%20Evaluacion%20del%20impacto%20del%20proceso%20de%20fermentacion%20en%20estado%20solido%20con%20Pleurotus%20ostreatus....pdf?sequence=2> >

Munishamanna, K. et al. 2017. Solid state fermentation of mango peel and mango seed waste by different yeast and bacteria for nutritional improvement. International Journal of Food and Fermentation Technology, 7(1), p.111. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.5958/2277-9396.2017.00011.3> >

Muniz, C. et al. 2020. Solid state fermentation for single-cell protein enrichment of guava and cashew by-products and inclusion on cereal bars. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 25, p. 101576. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101576> >



Naik, B. et al. 2019. Screening of agroindustrial waste and physical factors for the optimum production of pullulanase in solid-state fermentation from endophytic *Aspergillus sp.* Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 22, p.101423. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101423> >

Pandey, A. 2003. Solid-state fermentation. Biochemical Engineering Journal, 13(2-3), pp. 81-84- [en línea]. Disponible en: < [https://doi.org/10.1016/S1369-703X\(02\)00121-3](https://doi.org/10.1016/S1369-703X(02)00121-3) >

Paredes, L. et al. 2017. Optimización del medio para la producción de proteasas extracelulares por *Pseudomonas sp.* M211 en fermentación sumergida. Revista de la Sociedad Química del Perú, 83(4), pp. 449-462. [en línea]. Disponible en: < https://www.researchgate.net/publication/324439407_Optimizacion_del_medio_para_la_produccion_de_proteasas_extracelulares_por_Pseudomonas_sp_M211_en_fermentacion_sumergida >

Parzanese, M. 2016. Fermentación en sustrato sólido: aprovechamiento de subproductos de la agroindustria. Tecnologías para la Industria de los alimentos, 27, pp.1-13. [en línea]. Disponible en: < http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/sectores/tecnologia/Ficha_27_Fermentacion_en_sustrato_solido_para_el_aprovechamiento_de_subproductos_de_la_agroindustria.pdf >

Pastrana, L. 1996. Fundamentos de la fermentación en estado sólido y aplicación a la industria alimentaria. Ciencia y Tecnología Alimentaria, 1(3), pp.4-12. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1080/11358129609487556> >

Queiroz Santos, V. et al. 2018. Solid-state fermentation of soybean okara: isoflavones biotransformation, antioxidant activity and enhancement of nutritional quality. LWT, 92, pp. 509-515. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.067> >

Rashad, M.M. et al. 2015. Antioxidant and anticancer agents produced from pineapple waste by solid state fermentation. International Journal of Toxicological and Pharmacological Research, 7(6), pp. 287-296. [en línea]. Disponible en: < https://www.researchgate.net/publication/305467568_Antioxidant_and_anticancer_agents_produced_from_pineapple_waste_by_solid_state_fermentation >

Rodríguez de Olmos, A. et al. 2020. Metabolic profile of *Lactobacillus paracasei* subsp. *Paracasei* CRL 207 in solid state fermentation using commercial soybean meal. Food Bioscience, 35, p. 100584. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100584> >

Rompato, K.M. 2015. Protein enrichment of fruit processing byproducts using solid state fermentation with *Saccharomyces cerevisiae* and *Bacillus subtilis*. Biotecnología Aplicada, 32, pp. 4221-4227. [en línea]. Disponible en: < <http://scielo.sld.cu/pdf/bta/v32n4/bta03415.pdf> >

Sadh, P. et al. 2017. Bioaugmentation of phenolics and antioxidant activity of *Oryza sativa* by solid state fermentation using *Aspergillus spp.* International Food Research Journal, 24(3), pp. 1160-1166. [en línea]. Disponible en: < <https://www.cabdirect.org/cabdirect/FullTextPDF/2019/20193000074.pdf> >

Sadh, P. et al. 2018. Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review. Bioresources and Bioprocessing, 5(1). [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0187-z> >

Sadh, P. et al. 2018. Fermentation approach on phenolic, antioxidants and functional properties of peanut press cake. Food Bioscience, 22, pp. 113-120. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2018.01.011> >



Sadh, P. et al. 2018. Fermentation: A Boon for Production of Bioactive Compounds by Processing of Food Industries Wastes (By-Products). *Molecules*, 23(10), p.2560. [en línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/molecules23102560> >

Sarkar, A. et al. 2016. Natural antioxidants-The key to safe and sustainable life. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, 6(3), pp. 460-466. [en línea]. Disponible en: < https://www.researchgate.net/publication/292977321_Natural_Antioxidants_-_The_Key_to_Safe_and_Sustainable_Life >

Sharma, A. et al. 2017. Flavonoid-rich agro-industrial residues for enhanced bacterial laccase production by submerged and solid-state fermentation. *3 Biotech*, 7(3). [en línea]. Disponible en: < <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s13205-017-0836-0.pdf> >

Sousa, B et al. 2012. Phenolic content, antioxidant activity and anti-amylolytic activity of extracts obtained from bioprocessed pineapple and guava wastes. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1590/S0104-66322012000100003> >

Subramaniam, R. et al. 2012. Solid state and submerged fermentation for the production of bioactive substances: a comparative study. *International Journal of Science Nature*, 3(3), pp. 480-486. [en línea]. Disponible en: < https://www.researchgate.net/publication/232041875_Solid_state_and_submerged_fermentation_for_the_production_of_bioactive_substances_a_comparative_study >

Thakur, S. et al. 2015. Solid state fermentation of overheated soybean meal (waste) for production of protease using *Aspergillus oryzae*. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(1), pp.18456-18461. [en línea]. Disponible en: < http://ijirset.com/upload/2015/january/12_Solid.pdf >

Thomas, L. et al. 2013. Current developments in solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, pp.146-161. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.bej.2013.10.013> >

Torino, M. et al. 2013. Antioxidant and antihypertensive properties of liquid and solid state fermented lentils. *Food Chemistry*, 136(2), pp. 1030-1037. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.015> >

Torres-León, C. et al. 2019. Solid-state fermentation with *Aspergillus niger* to enhance the phenolic contents and antioxidative activity of Mexican mango seed: A promising source of natural antioxidants. *LWT*, 112, p. 108236. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.06.003> >

Torres-León, C. et al. 2019. Solid-state fermentation with *Aspergillus niger* to enhance the phenolic contents and antioxidative activity of Mexican mango seed: A promising source of natural antioxidants. *LWT*, 112, p. 108236. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.06.003> >

UNEP-UN Environment Programme. 2021. Índice de desperdicio de alimentos 2021. [en línea]. Disponible en: < <https://www.unep.org/es/resources/informe/indice-de-desperdicio-de-alimentos-2021> >

Veana, F. et al. 2014. Utilization of molasses and sugar cane bagasse for production of fungal invertase in solid state fermentation using *Aspergillus niger* GH1. *Brazilian Journal of Microbiology*, 45(2), pp. 373-377. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1590/S1517-83822014000200002> >

Vidhyalakshmi, R. et al. 2012. Production of Xanthan from agro-industrial waste. *Journal of Advanced Scientific Research*, 3(2), pp. 56-59. [en línea]. Disponible en: < https://sciensage.info/jasr/admin/uploads/paper/JASR_0603123.pdf >



Xiang, H. et al. 2019. Fermentation-enabled wellness foods: A fresh perspective. *Food Science and Human Wellness*, 8(3), pp. 203-243. [en línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213453019301053> >

Xiao, Y. et al. 2015. Effect of solid-state fermentation with *Cordyceps militaris* SN-18 on physicochemical and functional properties of chickpea (*Cicer arietinum* L.) flour. *LWT-Food Science and Technology*, 63(2), pp.1317-1324. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.04.046> >

Xing, Q. et al. 2020. Enhanced nutritional value of chickpea protein concentrate by dry separation and solid-state fermentation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 59, p. 102269. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102269> >

Xu, L. et al. 2019. Effects of solid-state fermentation on the nutritional components and antioxidant properties from quinoa. *Emirates Journal of Food Agriculture*, 31, pp.39-45

Zahan, K. et al. 2020. Monascorubin production by *Penicillium minioluteum* ED24 in a solid-state fermentation using sesame seed cake as substrate. *Materials Today: Proceedings*, 31, pp. 127-135- [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.347> >

Zamakona, J.I. 2019. Valorización de subproductos de la industria alimentaria mediante fermentación sólida y sumergida con *Rhizopus sp.* Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco. [en línea] Disponible en: < <http://hdl.handle.net/10810/33223> >

Zambrano, C. et al. 2018. Mobilization of phenolic antioxidants from grape, apple and pitahaya residues via solid state fungal fermentation and carbohydrase treatment. *LWT*, 89, pp. 457-465. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.11.025> >

Zhao, H. et al. 2017. Impact of solid state fermentation on nutritional, physical and flavor properties of wheat bran. *Food Chemistry*, 217, pp. 28-36. [en línea]. Disponible en: < <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.062> >