

El cerebro humano se desarrolló gracias a los alimentos fermentados

ALBERT BORDONS

Catedrático Emérito. Dpto. Bioquímica y Biotecnología, Facultad de Enología de Tarragona. Universitat Rovira i Virgili.

albert.bordons@urv.cat

Para SEM@Foro, artículo modificado y adaptado del original en catalán en el blog “*Bios i altres*” (19 enero 2024)

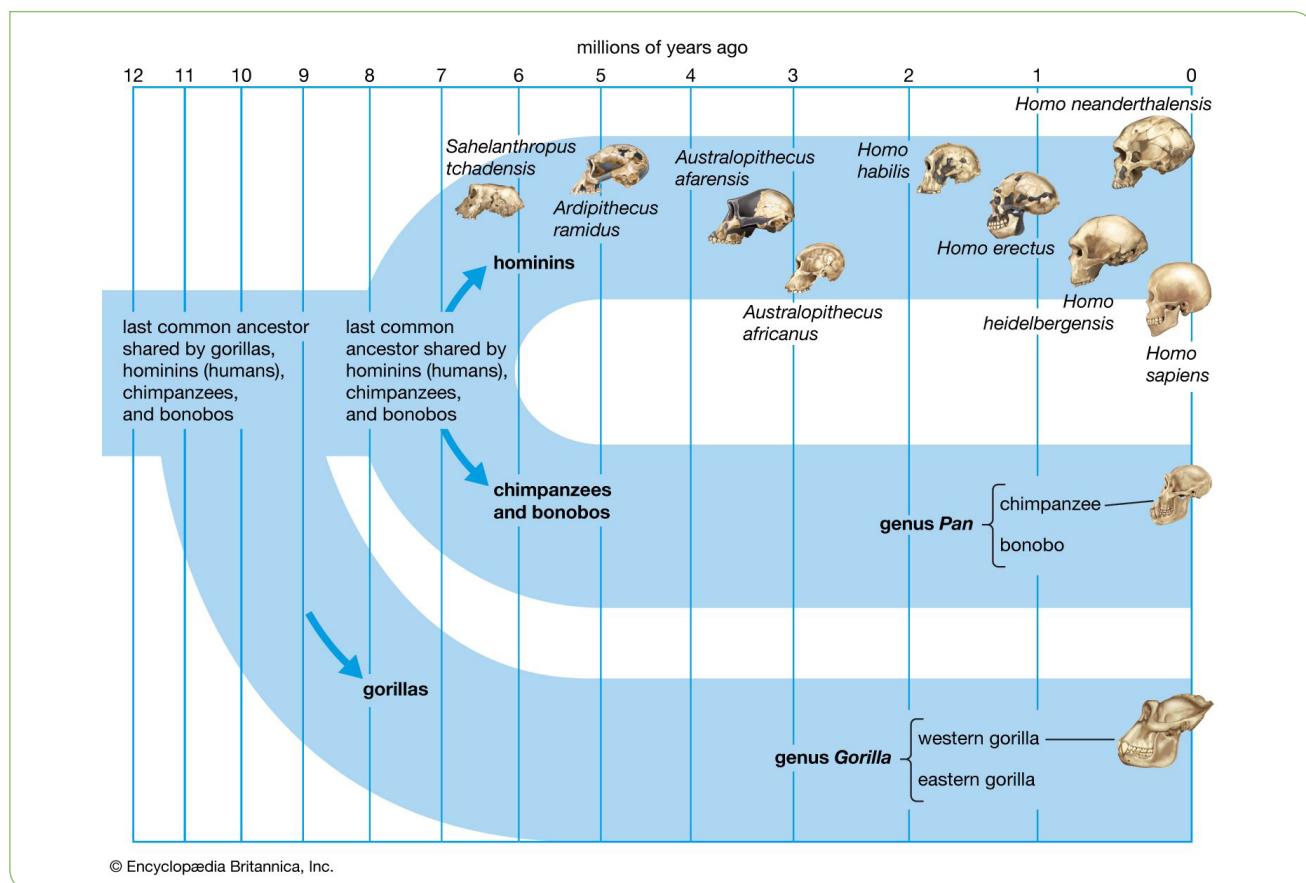


Figura 1. Evolución del cráneo desde los australopitecos a los humanos. Escala superior en millones de años (Encyclopædia Britannica, Inc.).

Hace poco encontré este título sorprendente en una noticia (Dyer 2023) de Science Alert, un *newsletter* —boletín informativo— digital de ciencias. Para conocer más detalles sobre esta hipótesis, fui al artículo original de Bryant *et al.* (2023) “*Fermentation technology as a driver of human brain expansion*”, con este sugerente aspecto que relaciona la aparición de nuestra especie con los microorganismos y su aprovechamiento.

Cerebro más grande

La principal característica distintiva de los humanos con respecto a otros primates y animales es el cerebro más grande y complejo. Debido a que cuanto mayor es un animal, mayor es el peso del encéfalo, se usa una medida relativa que es el cociente de encefalización (EQ), que es la relación entre la masa del cerebro y la esperada para un animal típico de las mis-

mas dimensiones. La EQ de *Homo sapiens* es de 7.5, mientras que para otros primates está entre 2 y 3, y para otros mamíferos como el perro es entre 1 y 2, excepto cetáceos como orcas o delfines, que tienen entre 3 y 4.

Por lo tanto, el **cerebro humano más que triplicó su tamaño** con respecto a otros primates en su evolución desde los últimos australopitecos (Figura 1) hace unos

2.5 millones de años (Ma) con un encéfalo de unos 400 cm³, hasta los primeros *Homo* (*H. habilis* y *H. erectus*) con unos 800 cm³, y para llegar a los 1200 cm³ de *H. sapiens* y *H. neanderthalensis* (Miller *et al.*, 2019). Obviamente, esta ampliación del cerebro y especialmente de la corteza frontal determinó el aumento en las capacidades del razonamiento, la reflexión, la adaptación, la socialización y otras habilidades, es decir, el desarrollo de la inteligencia humana.

Más cerebro y menos intestino

Hay varias teorías sobre los mecanismos que habrían favorecido esta expansión acelerada del cerebro. El factor limitante es la disponibilidad de recursos calóricos, porque el cerebro tiene un alto gasto metabólico en comparación con los otros órganos. La tasa metabólica del cerebro en reposo representa el 22% de la del cuerpo humano (McClave y Snider 2001).

Las mutaciones que condujeron a un aumento en el tamaño del cerebro, aunque tendrían beneficios finales claros, no serían adaptables si supusieran un mayor riesgo de hambre. Una reducción en la cantidad de tejido intestinal, que tiene necesidades metabólicas similares a las del cerebro, liberaría las calorías necesarias en la digestión para reasignarlas en el cerebro. Esto se confirma por el hecho de que el tamaño del colon de los humanos es la cuarta parte del correspondiente a los primates de nuestro tamaño (Tabla 1), mientras que el cerebro de *H. sapiens* actual es casi el triple de lo esperado.

Cambios de dieta

La reducción intestinal tuvo que ir acompañada de un cambio en la dieta, con

alimentos más fáciles de digerir y más energéticos. Los precursores de *Homo* habrían pasado de un régimen frugívoro-herbívoro a uno omnívoro-carnívoro. Las hipótesis actuales apuntan a los siguientes dos cambios, bien conocidos y plausibles:

- 1) El **mayor consumo de carne** se ha argumentado como uno de los elementos clave en la evolución humana. La dieta de *H. sapiens* es claramente más carnívora que en otros primates y por lo tanto la caza de otros animales debía haber sido un hábito creciente en los precursores de *Homo* (Mann 2000). Sin embargo, un punto débil de esta hipótesis es que la caza debía ser poco importante inicialmente, hace 1-2 Ma, ya que los primeros *Homo* eran principalmente recolectores, y la caza se desarrolló totalmente más tarde, hace unos 500.000 años, con el desarrollo de las primeras armas prehistóricas (Bryant *et al.*, 2023). Sin embargo, parece que el consumo de carroña dejada por otros animales carnívoros, o el quitarles las presas a ellos, fue anterior a la caza, probablemente desde los inicios del Pleistoceno, hace unos 3 Ma.

El consumo de proteína animal no se limita a la carne de mamíferos y aves. Hay que tener en cuenta la pesca y, sobre todo, la recolección de mariscos. Se han encontrado muchos acúmulos prehistóricos de conchas de moluscos. Los más antiguos son los de Pinnacle Point en Sudáfrica hace 160.000 años, muy importantes porque junto con otros restos son una de las pruebas de los primeros *H. sapiens* (Marean *et al.*, 2007), pero por supuesto, son más tardíos que el desarrollo del cerebro.

- 2) La **domesticación del fuego** y la consiguiente posibilidad de **cocinar alimentos** fue otro elemento crucial para obtener más sustratos calóricos biodisponibles y digerirlos más fácilmente, tanto para masticarlos como de menor gasto energético en el tracto digestivo. Esto es muy evidente en el consumo de carne, tanto fresca como carroña, y también para mitigar la contaminación microbiana. Además, el cocinado permitió la ingestión de alimentos vegetales y especialmente los nutritivos tubérculos, que no son directamente digeribles y/o contienen compuestos tóxicos si no están cocidos (Wragg *et al.*, 1999).

Sin embargo, no hay pruebas arqueológicas claras de que los australopíticos o los primeros *Homo* dominaran el fuego, ya que la primera evidencia clara es de *H. erectus* de hace 800.000 años (Goren-Inbar *et al.*, 2004). Por lo tanto, el control total del fuego habría sido posterior al gran desarrollo del cerebro. De hecho, una buena pericia y control del fuego requiere la capacidad cognitiva para crearlo, mantenerlo y usarlo de manera efectiva, es decir, un cerebro más desarrollado que el de los australopíticos (Bryant *et al.*, 2023).

Hipótesis de la fermentación “externa” de los alimentos

En su artículo, Bryant *et al.* (2023) proponen el término de “externa” para diferenciarlo de la fermentación “interna” realizada por la microbiota intestinal humana en la digestión. La idea es que la externalización de parte del proceso interno liberó los requisitos de energía corporal que permitieron la expansión cerebral.

El término “fermentación” se usa aquí en su acepción general de transformación de los compuestos orgánicos por microorganismos, aunque el significado original del concepto de “fermentación” es en su sentido bioquímico el tipo de metabolismo anaeróbico donde la fuente de energía y la de carbono son compuestos orgánicos, así como el aceptor de electrones. La mayoría de los **alimentos fermentados** conocidos (Figura 2) conllevan una fermentación en este sentido bioquímico, como la fermentación láctica.

TABLA 1
MASAS ESPERADAS DE ALGUNOS ÓRGANOS HUMANOS BASADAS EN LOS VALORES DE LOS GRANDES SIMIOS EN COMPARACIÓN CON LOS REALES DE UN HUMANO OCCIDENTAL DE 65 KG
(adaptado de Bryant *et al.*, 2023).

Órgano	Masa esperada (kg)	Masa real (kg)	Masa real / esperada
Corazón	0.32	0.30	0.94
Hígado	0.24	0.30	1.25
Intestino delgado	0.40	0.62	1.55
Colon	0.85	0.22	0.26
Cerebro	0.45	1.30	2.89



Figura 2. Algunos ejemplos de alimentos fermentados actuales: sobrasada, aceitunas de mesa, salsa de soja, yogurt, quesos, cerveza y vino.

tación láctica o la alcohólica, aunque otros procesos de transformación microbiana que incluimos al hablar de “fermentación” en general, son debidos a otros tipos de metabolismo, como la respiración aeróbica, u otras reacciones.

Aunque no es usual llamarla así, la digestión que tiene lugar en el trato gastrointestinal incluye esta “**fermentación interna**”, entendiendo como tal la intervención microbiana, o sea el conjunto de transformaciones que realiza la **microbiota intestinal**. La digestión de una parte importante de los componentes fibrosos vegetales requiere de esta fermentación interna microbiana. En los rumiantes esto se consigue además con estómagos adicionales y una abundante microbiota celulolítica. En otros animales no rumiantes, incluidos los primates, se dispone de un colon y un ciego más desarrollados, y una mayor área para la absorción de los nutrientes. El colon de los humanos y muchos primates contiene unos 10^{12} microbios por mL y cada vez es más patente la relevancia de esta microbiota para la salud, en cuanto a absorción de nutrientes, regulación energética y un buen sistema inmune (O’Hara & Shanahan 2006).

La fibra soluble, sobre todo los oligosacáridos, es fermentada por la microbiota

TABLA 2
ENERGÍA DERIVADA DE LOS ÁCIDOS GRASOS DE CADENA CORTA PRODUCIDOS POR LA MICROBIOTA INTESTINAL.

Especie	Dieta	% Energía del total digerido
Vaca / toro	Herbívoro rumiante	72
Oveja	Herbívoro rumiante	84
Conejo	Herbívoro monogástrico	32
Cerdo	Omnívoro	36
Gorila	Herbívoro monogástrico	57
<i>Homo sapiens</i>	Omnívoro	2-10

produciendo sobre todo ácidos grasos de cadena corta (AGCC)—acetato, propionato y butirato—, que aportan unas 2 cal/g, que supone un 50% adicional a las 4 cal/g de la digestión directa de los carbohidratos fáciles (almidón, azúcares). Estas 2 cal/g son un 2-10% de la energía total que la dieta nos proporciona, muy poca comparada con otros mamíferos (Tabla 2).

A parte de los AGCC, los nutrientes principales producidos por la microbiota son las vitaminas del complejo B y la K, que son absorbidas por el intestino. Además, la microbiota aumenta la biodisponibilidad de micronutrientes minerales mediante la degradación de factores antinutricionales

como los fitatos y oxalatos —presentes en muchos vegetales— que forman complejos con los cationes (Fe, Zn, Mg, Ca, etc.) y previenen su absorción.

La **fermentación externa** de los alimentos que empezaron a realizar los primeros humanos tiene unas funciones similares a la interna como es el aumento de la biodisponibilidad y absorción de macronutrientes y micronutrientes. Con ello, se **aumenta la digestibilidad** de carbohidratos y proteínas, por ejemplo en las legumbres hidrolizando las macromoléculas a aminoácidos y azúcares más digeribles. Y los comentados fitatos y oxalatos pueden ser degradados por la fitasa que producen bacterias lácticas

en la fermentación externa, con lo que se aumenta la absorción de minerales. La eliminación del fitato es incluso más efectiva fermentando que por cocción, ya que por encima de 80°C la fitasa no actúa.

Un gran beneficio de la fermentación externa es que puede hacer que **alimentos tóxicos dejen de serlo**. El caso más conocido es la destoxicación de los glicósidos cianogénicos de la mandioca (o Yuca o casava), un alimento básico de millones de personas en las zonas tropicales. Si no se fermenta, estos glicósidos son hidrolizados por los microbios del colon produciendo cianuro. Cuando se fermenta adecuadamente las bacterias lácticas rompen las paredes celulares de los tubérculos y permiten la hidrólisis de la toxina (Padmaja & Steinkraus 1995).

Además, la fermentación externa de los alimentos contribuye a una **mejor eficacia de la microbiota intestinal** en la digestión. En primer lugar, parte de la microbiota ingerida con el alimento fermentado puede colonizar el intestino, aumentando la capacidad de fermentar más nutrientes, y favoreciendo que algunos microbios endógenos produzcan bacteriocinas contra posibles patógenos. Estos beneficios también son posibles aunque los microbios del alimento fermentado sólo tengan un contacto transitorio con las bacterias residentes (Ohland & MacNaughton 2010). Con ello, la fermentación externa puede ayudar a proteger al huésped de infecciones y enfermedades, puesto que una microbiota correcta está relacionada con una reducción de los desórdenes gastrointestinales (Alexander *et al.*, 2019).

La fermentación externa de alimentos, impulsora de la expansión del cerebro

Como hemos visto antes, parece que los cambios de dieta desde los australopitecos a *Homo*, como el mayor consumo de carne o de alimentos cocinados con el dominio del fuego, son relativamente posteriores a la expansión del cerebro, y sólo con estos cambios no se acaba de explicar el rápido desarrollo del cerebro, simultáneo a la reducción del colon y el desplazamiento de gasto energético del intestino al cerebro.

Para los **inicios de la fermentación externa** de alimentos no haría falta una

gran capacidad de razonamiento. Los australopitecos —que ya eran bípedos y por lo tanto tenían sus manos libres— ya tenían algunas herramientas sencillas que podrían utilizar para despellejar animales capturados o de la carroña, y podrían **transportar estos alimentos** hasta la morada, ya fuera ésta una cueva o un refugio temporal. También podrían transportar frutos, tubérculos y otros alimentos potenciales. Aunque los chimpancés ocasionalmente pueden transportar herramientas temporales o los restos de animales cazados, lo hacen en distancias cortas, de unos cientos de metros a lo sumo, y la mayoría de los alimentos los consumen en el lugar de captura.

Una vez en la morada, estos primeros *Homo* debían dejar la comida para ir consumiéndola y seguramente acumulando más de la capturada. La **reutilización del sitio de almacenamiento** habría promovido un ecosistema microbiano que conduciría a la fermentación. Los alimentos incorporados de nuevo serían inoculados con los microbios ya presentes en el sitio, o a través del cuerpo de los propios humanos, las manos por ejemplo. Esta práctica transmitida socialmente de reutilizar sitios, contenedores o herramientas para manipular los alimentos habría ido promoviendo las fermentaciones y la estabilidad de los agentes microbianos fermentativos. Como en todo proceso de selección, esta tecnología primitiva se habría ido modificando, sobre todo aprendiendo a no consumir los productos dañados con patógenos o compuestos tóxicos, seguramente con más de una víctima por el camino.

La fermentación externa de los alimentos **requiere pocos conocimientos**, bastante menos que la utilización del fuego, ya que la fermentación es un proceso natural que puede pasar espontáneamente, y es un proceso pasivo para el que no se requiere un esfuerzo activo como mantener el fuego. Además, la fermentación puede preservar los alimentos durante mucho tiempo, incluso años, gracias sobre todo a los productos de la fermentación como el ácido láctico o el etanol.

Seguramente la fermentación se iría combinando con otras técnicas de conservación como ahumado, secado y salado, como se hace actualmente. Pero la facilidad de la fermentación en muy diversos tipos de alimentos, ambientes y condiciones debió de permitir su difusión. La prue-

ba más evidente es que en la actualidad existen **múltiples alimentos fermentados**, en prácticamente todas las partes del mundo. Se calcula que existen más de 5000 variedades de ellos, que según la FAO son el 35% del mercado actual de todos los alimentos. Vemos los más conocidos en la Tabla 3.

Como sabemos bien y lo vemos confirmado en la Tabla 3, los principales **microorganismos** implicados en estas fermentaciones “externas” —y espontáneas en origen—son las bacterias del ácido láctico o bacterias lácticas (BL) y las levaduras. Ello es debido fundamentalmente a la producción de ácido láctico y etanol, respectivamente, que son dos de los mejores conservantes de alimentos y bebidas. Además, otros microorganismos importantes son los mohos (*Rhizopus*, *Aspergillus*, *Penicillium*, etc.) y otras bacterias como *Bacillus*, enterobacterias, acéticas y otras, además de algún arquea ocasionalmente.

Los alimentos fermentados son actualmente una parte importante de la dieta humana en todo el mundo, tanto en regiones en las que actualmente la seguridad alimentaria no está bien controlada, como también en las regiones más desarrolladas. Es una **tecnología global**, y por lo tanto es una prueba de que proviene de los primeros humanos.

Además, aunque las prácticas culturales de fermentar alimentos son muy variadas, parece claro que por lo general los alimentos fermentados **nos gustan**. Esta preferencia habría emergido en paralelo a una atracción adaptativa por los aromas y texturas propias de estos fermentados por parte de los primeros humanos. Por eso hay muchos de estos alimentos que son condimentos, que se añaden a otros alimentos para mejorar su palatabilidad (Bryant *et al.*, 2023). Algunos gustos y aromas extraños son muy apreciados por unas culturas y detestados por otros, como ocurre con algunos quesos muy malolientes, con compuestos volátiles amoniacales y de azufre. Existe una **especificidad cultural** en su consumo. Los mismos aromas que pueden ser señal de comida “buena” en una cultura pueden ser señal de comida mala o pasada en otra. La capacidad para “degustar” comidas ácidas, agrias o amargas, gustos no habituales en los alimentos naturales y ausentes en otros animales, seguramente evolucionó en los humanos con la producción de alimentos fermentados (Frank *et al.*, 2022).

TABLA 3
RELACIÓN DE ALIMENTOS FERMENTADOS, ORDENADOS POR EL TIPO DE SUSTRATO
 (modificada y ampliada de Bryant *et al.*, 2023).

Sustrato vegetal: hojas, raíces	Productos	Lugar de origen	Microorganismos
Hojas de col, y a veces rábano y otros	Chucrut, Kimchi	Europa, Asia E	Bacterias del ácido láctico (BL), enterobacterias
Hojas de té	Kombucha, Pu-erh (bebidas)	Asia E	Bacterias acéticas, levaduras, mohos
Hojas de parra	Dolmas o dolmades, con rellenos diversos	Europa SE, Asia W	BL
Hojas de rábano, col y otros	Gundruk	Nepal	BL
Raíz de rábano	Sinki	Nepal	BL
Raíz de mandioca o ñame	Garri, Fufu	África W	BL, mohos, levaduras
Tubérculo de taro	Sapal, Poi	Papúa Nueva Guinea, Hawái	BL, levaduras
Patata	Tocosh	América S	BL
Sustrato vegetal: frutos, semillas	Productos	Lugar de origen	Microorganismos
Semillas de soja	Natto, Kinema, otros	Japón, Asia E	<i>Bacillus subtilis</i>
Soja, arroz, pimienta, cereales	Salsa Gochujang	Corea	<i>Bacillus</i> , <i>Enterococcus</i> , cianobacteria <i>Aerosakkonema</i> , mohos
Semillas de soja, cereales	Tempeh, Salsa de soja, Miso	Indonesia, Asia E, Japón	<i>Rhizopus</i> , <i>Aspergillus oryzae</i> , BL, levaduras
Soja, mandioca, otros	Oncom	Indonesia	<i>Rhizopus</i> , <i>Neurospora</i>
Semillas de néró (fabácea)	Sumbala, Dawadawa	África W	<i>Bacillus</i> , BL
Semillas de cafeto	Café	África E	Enterobacterias, <i>Bacillus</i> , BL y levaduras
Semillas de cacao	Cacao	América central y S	Levaduras, BL y bacterias acéticas
Frutos de olivo	Aceitunas de mesa	Mediterráneo	BL, levaduras
Pepinos, berenjenas, rábanos, otros	Pepinillos y otros encurtidos	Mediterráneo	BL, bacterias acéticas
Vinos, otros frutos fermentados	Vinagres	Mediterráneo	Bacterias acéticas
Semillas de cereales	Masa madre	Europa, Asia W, América N	BL, levaduras
Arroz y leche de coco	Appam (torta plana)	India	BL, levaduras
Arroz y lentejas	Idli	India	BL
Semillas de maíz	Kenkey	África W	BL, levaduras
Semillas de maíz y cacao	Pozol (bebida)	América central	BL, otras bacterias, levaduras, mohos
Semillas de cereales (<i>Eragrostis tef</i>)	Injera (torta plana)	Etiopía, África E	BL, <i>Bacillus</i> , enterobacterias, levaduras
Sustrato vegetal: frutas, cereales	Productos: Bebidas alcohólicas	Lugar de origen	Microorganismos
Savia del tallo floral del maguey (<i>Agave</i>)	Pulque	México	<i>Zymomonas</i> , BL, levaduras
Uvas de <i>Vitis vinifera</i>	Vino	Mediterráneo	Levaduras, y BL en maloláctica
Manzana	Sidra	Europa W	Levaduras
Pera	Sidra de pera	Reino Unido, Francia	Levaduras
Frutas diversas: cereza, plátano, otras	Vinos de fruta	Europa N, América central	Levaduras
Semillas de cebada y otros cereales	Cervezas	Europa, Asia W	Levaduras
Cereales	Cervezas ácidas	Bélgica, Alemania	Levaduras, BL
Cereales	Kvass	Europa E	Levaduras, BL
Arroz	Sake, vino de arroz	Japón	Levaduras, <i>Aspergillus</i>
Cereales	Makgeolli, vino de arroz coreano	Corea	Levaduras, <i>Aspergillus</i> , BL, proteobacterias
Maíz	Chicha	América S	BL, otras bacterias, levaduras

TABLA 3 (Continuación)
RELACIÓN DE ALIMENTOS FERMENTADOS, ORDENADOS POR EL TIPO DE SUSTRATO
(modificada y ampliada de Bryant *et al.*, 2023).

Sustrato animal:	Producto	Lugar de origen	Microorganismos
Miel de abejas	Hidromiel, Tej etíope (bebida alcohólica)	África, Asia, Europa	Levaduras
Leche de diversos mamíferos	Quesos	Mundial	BL, otras bacterias, levaduras, mohos
Leche de vaca	Yogurt, Crème fraîche, Kéfir	Europa E, Asia W	BL, levaduras
Leche de vaca	Leben	África N, Asia W	BL
Leche de yegua	Kumis	Asia central, América S	BL, levaduras
Leche de camella	Chal	Asia central	BL, levaduras
Suero de mantequilla	Buttermilk	Europa, Asia W	BL
Carne de cerdo y otros	Embutidos, Jamón	Europa	BL, otras bacterias, levaduras, mohos
Carne de cerdo, arroz y hojas plátano	Nem chua, Satchu	Vietnam, Himalaya	BL, otras bacterias, levaduras, mohos
Carne de bisonte, ciervo y de otros	Pemmican	América N	Diversas bacterias
Huesos de animales	Dodery	Sudán	<i>Bacillus</i> , otras bacterias, BL, levaduras
Mejillones, erizos, otros mariscos	Tiroi Kina	Nueva Zelanda	Diversas bacterias, BL
Carne de tiburón	Hákarl	Islandia	Proteobacterias: <i>Moraxella</i> , <i>Acinetobacter</i>
Pez ciprínido	Ngari	India, Himalaya	BL, <i>Bacillus</i> , levaduras
Arenque	Surströmming	Suecia, Europa N	<i>Halanaerobium</i> (arquea), BL, otras bacterias
Peces diversos	Nam-pla, bagoong, otros	Asia SE, Filipinas, Europa	<i>Bacillus</i> , otras bacterias, arqueas halófilas
Vísceras de pescado	Salsa Garo	Antiguas Grecia, Roma, Bizancio	Diversas bacterias y arqueas

Como veíamos (Tablas 1 y 2), el desarrollo de la fermentación externa de alimentos fue ligada a una pérdida importante de masa del colon y de la energía en él producida, lo cual implica una reducción en la cantidad y diversidad de la microbiota intestinal porque éstos no serían tan necesarios. Esto se evidencia al realizar análisis comparativos de la microbiota humana con la de los otros homínidos como chimpancés, bonobos o gorilas (Moeller *et al.*, 2014). Pese a la relevancia de la microbiota intestinal cada vez más manifiesta, sorprende que con el desarrollo de esta "fermentación externa" los

humanos hemos prescindido un poco de ella y la hemos reducido en comparación con los demás primates (Gylad *et al.*, 2005).

Por su parte, la preferencia de los humanos para los alimentos fermentados también se demuestra con análisis genéticos. Por ejemplo, algunos genes de **receptores olfativos** relacionados con productos fermentados están seleccionados positivamente en humanos y no en chimpancés, como son los del octanoato de metilo, de olor afrutado producido por las levaduras de vinificación, o del metilvalérico, aroma clave de los quesos madurados.

Conclusión

Esta hipótesis de la fermentación externa de los alimentos como elemento clave en la expansión del cerebro en la evolución desde los australopitecos a los humanos parece bastante verosímil. La fermentación de los alimentos en muchos casos es casi espontánea, inicialmente requiere muy poca tecnología y conocimientos, y con una mínima selección de los productos resultantes después de la fermentación se obtienen alimentos más digeribles, que se conservan mejor, y que tienen gustos o texturas nuevas e interesantes.

El desarrollo de los alimentos fermentados permitió que no fuera necesario tener un volumen considerable de colon con su microbiota tan diversa para adquirir nutrientes que se pueden consumir elaborándolos previamente. Al reducirse las necesidades calóricas del colon, la energía "sobrante" pudo ser dedicada cada vez más al cerebro, facilitando su expansión. En paralelo, o en algunos casos posteriormente, otros factores importantes como el consumo de carne, la tecnología de la caza, la socialización, y el fuego, permitieron aún más esta expansión cerebral, hasta llegar a *H. sapiens*.

Por último, debo señalar el interés de este tema porque en él se unen tres campos muy atractivos científicamente: los alimentos fermentados, la microbiota intestinal, y el origen de nuestra especie *H. sapiens*.

Bibliografía

- **Alexander C, Swanson KS, Fahey GC, Garleb KA** (2019). Perspective: physiologic importance of short-chain fatty acids from nondigestible carbohydrate fermentation. *Adv Nutr* 10, 576–589.
 - **Bryant KL, Hansen C, Hecht EE** (2023). Fermentation technology as a driver of human brain expansion. *Commun Biol* 6, 1190.
 - **Dyer R** (2023). Food preserving technique may have sparked human brain growth, scientists say. *Science Alert - Humans*, 3/12/2023.
 - **Frank HER, Amato K, Trautwein M et al.** (2022). The evolution of sour taste. *Proc. Biol. Sci.* 289, 20211918.
 - **Goren-Inbar N, Alperson N, Kislev ME et al.** (2004). Evidence of Hominin Control of Fire at Gesher Benot Ya`aqov, Israel. *Science* 304, 725–727.
 - **Gylad Y, Man O, Glusman G** (2005). A comparison of the human and chimpanzee olfactory receptor gene repertoires. *Genome Res* 15, 224–230.
 - **Mann N** (2000). Dietary lean red meat and human evolution. *Eur J Nutr* 39, 71–79 (2000).
 - **Marean C, Bar-Matthews M, Bernatchez J et al.** (2007). Early human use of marine resources and pigment in South Africa during the Middle Pleistocene. *Nature* 449, 905–908.
 - **McClave SA, Snider HL** (2001). Dissecting the energy needs of the body. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care* 4(2):143-7.
 - **Miller IF, Barton RF, Nunn CL** (2019). Quantitative uniqueness of human brain evolution revealed through phylogenetic comparative analysis. *eLife* 8:e41250.
 - **Moeller AH, Li Y, Ngole EM et al.** (2014). Rapid changes in the gut microbiome during human evolution. *Proc Natl Acad Sci USA* 111, 16431–16435.
 - **O'Hara AM, Shanahan F** (2006). The gut flora as a forgotten organ. *EMBO Rep* 7, 688–693.
 - **Ohland CL, Macnaughton WK** (2010). Probiotic bacteria and intestinal epithelial barrier function. *Am J Physiol Gastrointest Liver Physiol* 298, G807–19.
 - **Padmaja G, Steinkraus KH** (1995). Cyanide detoxification in cassava for food and feed uses. *Crit Rev Food Sci Nutr* 35, 299–339.
 - **Wrangham RW, Jones JH, Laden G et al.** (1999). The Raw and the Stolen: Cooking and the Ecology of Human Origins. *Curr Anthropol* 40:5, 567–594.
-