

CAPTADORES DE MICOTOXINAS

Esther Hernández González

Directora de Calidad y Seguridad Alimentaria
Nuevas Tecnologías de Gestión Alimentaria, S.L.

1.- INTRODUCCIÓN

Las micotoxinas son unos metabolitos tóxicos, producidos por unas pocas especies de hongos, principalmente del género *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium*, con capacidad para infestar cosechas en el campo o después de la cosecha y que representan un riesgo potencial para la salud de las personas y los animales a través de la ingestión de alimentos o piensos elaborados a partir de dichas materias primas.

Según la Organización Mundial de la Salud se estima que el 25% de los cultivos a nivel mundial están afectados por micotoxinas, provocando enfermedades en los humanos y en los animales, lo que se traduce en unas considerables pérdidas económicas a nivel mundial. Las micotoxinas son consideradas un peligro potencial para la salud pública. La exposición humana a las micotoxinas se produce directamente a través de la ingestión de productos agrícolas contaminados o indirectamente a través del consumo de productos de origen animal como la leche, los huevos o la carne, obtenidos a partir de animales que fueron alimentados con productos contaminados por micotoxinas. Numerosas enfermedades en humanos y en animales están relacionadas con la ingesta de micotoxinas.

Hoy en día, existe una serie de estrategias pre y post cosecha para mitigar la contaminación fúngica y, por ende, la formación de micotoxinas, como son selección de semillas resistentes a los hongos, tratamientos fúngicos, etc., pero no siempre se logra impedir la generación de estas toxinas. Una alternativa que permite reducir al máximo la

presencia de estas sustancias es la inclusión de detoxificadores, como son los agentes adsorbentes o los biotransformadores en los alimentos.

2.- MICOTOXINAS

La mayoría de las micotoxinas son químicamente estables y tienden a permanecer durante el almacenamiento y el procesado de los productos, incluso cuando estos productos son cocinados a altas temperaturas. Este hecho hace aún más importante reforzar los esfuerzos para evitar las condiciones que favorecen la formación de micotoxinas.

Son muchos los factores que intervienen en el proceso de proliferación fúngica y de la contaminación con micotoxinas, como por ejemplo la temperatura y humedad, tipo de suelo, la susceptibilidad del cultivo y de la variedad de que se trate, la madurez de los granos en el momento de la cosecha, los daños mecánicos o los producidos por insectos sobre el cultivo, el tipo y condiciones de almacenamiento.

La presencia de hongos en los productos, no implica la existencia de micotoxinas y del mismo modo, puede detectarse una micotoxina sin la presencia del hongo productor. Por otro lado, un hongo puede producir más de una micotoxina, por ejemplo, *Fusarium* puede producir Deoxinivalenol y Zearalenona y una micotoxina puede ser producida por diferentes géneros de hongos, por ejemplo, Ocratoxina es producida por el hongo *Aspergillus ochraceus* y *Penicillium verrucosum*.

La toxicidad está influenciada por una serie de factores como:

- Tipo de micotoxina, biodisponibilidad y concentración de la misma en el alimento.
- Coexistencia de micotoxinas.
- Cantidad de alimento contaminado consumido y periodo de ingestión del mismo.
- Especie animal, peso del individuo, edad, estado fisiológico y productivo.

3.- PREVENCIÓN Y REDUCCIÓN DE MICOTOXINAS

La prevención y reducción de la presencia de micotoxinas en los alimentos es fundamental y puede conseguirse mediante la aplicación de determinadas medidas preventivas y de control a lo largo de toda la cadena. La aplicación de un Sistema de Peligros y Puntos Críticos de Control, en el conjunto de toda la cadena (desde el cultivo hasta el consumidor final) podría contribuir a reducir la presencia de micotoxinas en los alimentos. De esta manera, se introducirían medidas preventivas en todas aquellas fases donde se sabe que existe una mayor probabilidad de que se produzca esta contaminación, o que esta se incremente hasta niveles inaceptables.

4.- PREVENCIÓN DE LA APARICIÓN

- Antes de la siembra:
 - ✓ Elaborar y mantener un plan de rotación de cultivos, evitar cultivar 2 años seguidos el mismo cultivo.
 - ✓ Usar variedades resistentes a los hongos.
 - ✓ Utilizar semillas tratadas.
 - ✓ Preparación de terrenos arando y enterrando los restos del cultivo anterior.
 - ✓ Evitar el hacinamiento de las plantas.

- Durante el cultivo y antes de la cosecha:
 - ✓ Evitar el estrés de la planta por falta de riego.
 - ✓ Uso de estrategias de control biológico (empleo de agentes no toxigénicos que compiten biológicamente con los mohos formadores de micotoxinas).
 - ✓ Evitar el riego por aspersión en el momento de la floración.
 - ✓ Controlar las plagas y las malas hierbas.
 - ✓ Recolectar los cultivos cuando estén totalmente maduros.

- Post-cosecha y almacenamiento:
 - ✓ Evitar apilamientos de productos húmedos
 - ✓ Adición de fungicidas (ácidos) para inhibir el crecimiento de los hongos
 - ✓ El almacenamiento a baja actividad de agua ($a_w < 0,73$), baja temperatura y una adecuada ventilación.
 - ✓ La clasificación y la eliminación de granos con moho.
 - ✓ Realizar un secado antes del almacenamiento.

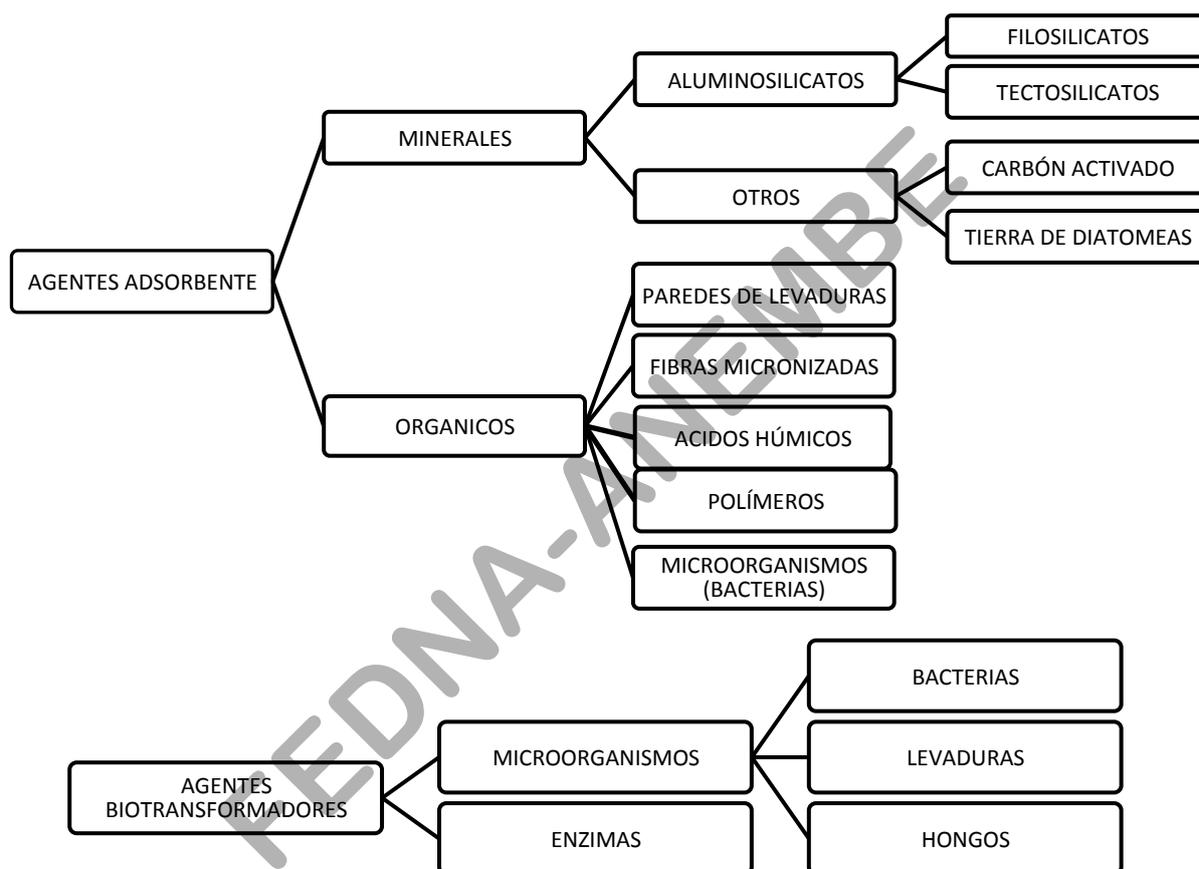
5.- AGENTES REDUCTORES O DETOXIFICADORES DE MICOTOXINAS

El Reglamento (CE) N° 386/2009 De la Comisión de 12 de mayo de 2009, establece un nuevo grupo funcional de aditivos para piensos: Reductores de la contaminación de los piensos por micotoxinas, siendo su definición “*sustancias que pueden suprimir o reducir la absorción, promover la excreción o modificar el modo de acción de las micotoxinas*”.

Forma de actuación: Dependiendo de su modo de acción, estos aditivos pueden actuar, reduciendo la biodisponibilidad de las micotoxinas o degradarlas o transformarlas en metabolitos menos tóxicos.

- **Agentes adsorbentes:** son compuestos que actúan como secuestrantes químicos, tienen la capacidad de quelar a las micotoxinas, formando enlaces, lo cual permite reducir su disponibilidad.
- **Agentes biotransformadores:** son microorganismos o enzimas que degradan las micotoxinas en metabolitos menos tóxicos.

Clasificación de los diferentes de detoxificadores o reductores de micotoxinas (Adaptado de la EFSA, 2009):



6.- AGENTES ADSORBENTES

Los agentes adsorbentes son compuestos capaces de unirse a las micotoxinas que se encuentran en el alimento evitando su disociación en el tracto digestivo del animal. De esta manera, el complejo toxina-adsorbente pasa por el animal y es eliminado en las heces. Los agentes adsorbentes pueden ser clasificados de manera general en dos grupos: adsorbentes minerales y adsorbentes orgánicos.

6.1.- Agentes adsorbentes minerales

6.1.1.- Aluminosilicates

El grupo de los adsorbentes minerales más estudiado por sus propiedades detoxificadoras de micotoxinas es el grupo de los aluminosilicatos. Estos minerales contienen óxido de aluminio (Al_2O_3) y dióxido de silicio (SiO_2).

Las propiedades de los aluminosilicatos dependen más de la estructura cristalina en que se disponen sus átomos, que de los elementos químicos que constituyen su fórmula.

Dentro de este grupo hay 2 subclases importantes: los Filosilicatos y los Tectosilicatos.

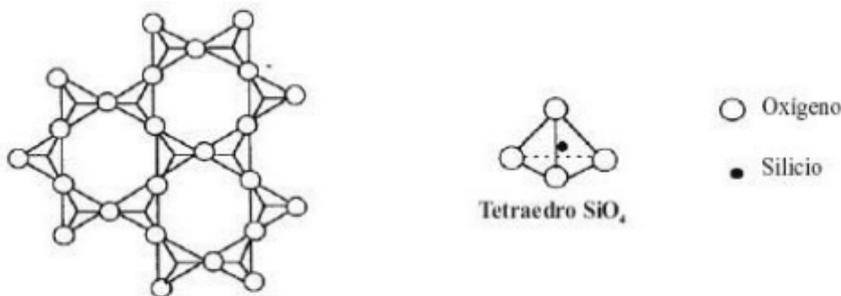
7.- FILOSILICATOS

Grupo de minerales que presentan estructuras de tetraedros de SiO_4 , unidos por tres vértices a otros, formando una capa que se extiende en un plano de extensiones indefinidas. Dentro del extenso grupo de los Filosilicatos existen unos minerales que por presentar unas características similares se agrupan en los llamados minerales arcillosos.

Es necesario conocer la estructura de los minerales pertenecientes al grupo de los Filosilicatos, para poder comprender su funcionamiento.

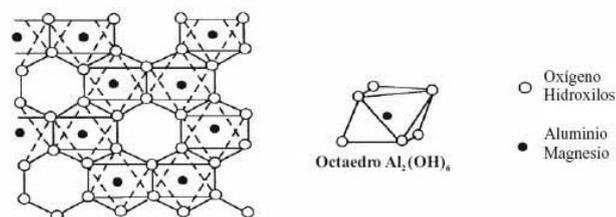
Los Filosilicatos están formados por 2 bloques básicos:

Capa u hoja tetraédrica: formada por tetraedros de SiO_4 : cada tetraedro comparte 3 vértices (3 oxígenos) con tetraedros vecino, formando una capa de extensión indefinida. El silicio tetraédrico puede estar en parte sustituido por Al^{3+} ó Fe^{3+} .



Fuente: Technological applications of modified clays. Rev. Soc. Quím. Perú v.74 n.1 Lima ene./mar. 2008 (http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=s1810-634x2008000100007&script=sci_arttext)

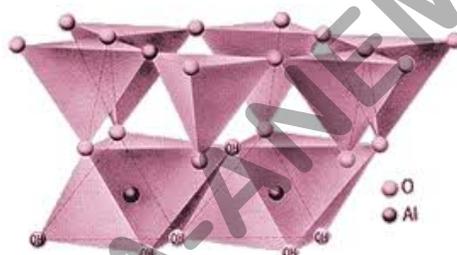
Capa u hoja octaédrica: constituida por una serie de octaedros con grupos OH o con átomos de O en los vértices (compuestas por Al-O y Al-(OH)). El aluminio puede ser sustituido por cationes divalentes (Mg^{2+}) o trivalentes (Al^{3+}).



Fuente: Technological applications of modified clays. Rev. Soc. Quím.

Perú v.74 n.1 Lima ene./mar. 2008 (http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=s1810-634x2008000100007&script=sci_arttext)

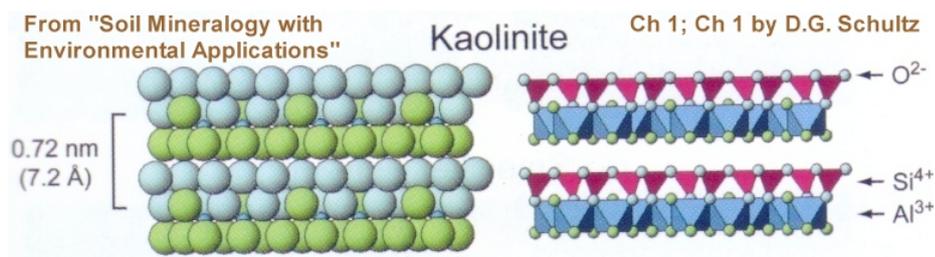
7.1.- Estructura básica de los filosilicatos



Fuente: http://www2.uned.es/cristamine/min_descr/clases/silicatos/filosilicatos.htm

Los filosilicatos se clasifican por la forma en que se apilan las capas tetraédricas y las octaédricas, estableciéndose así 3 tipos básicos de *filosilicatos*.

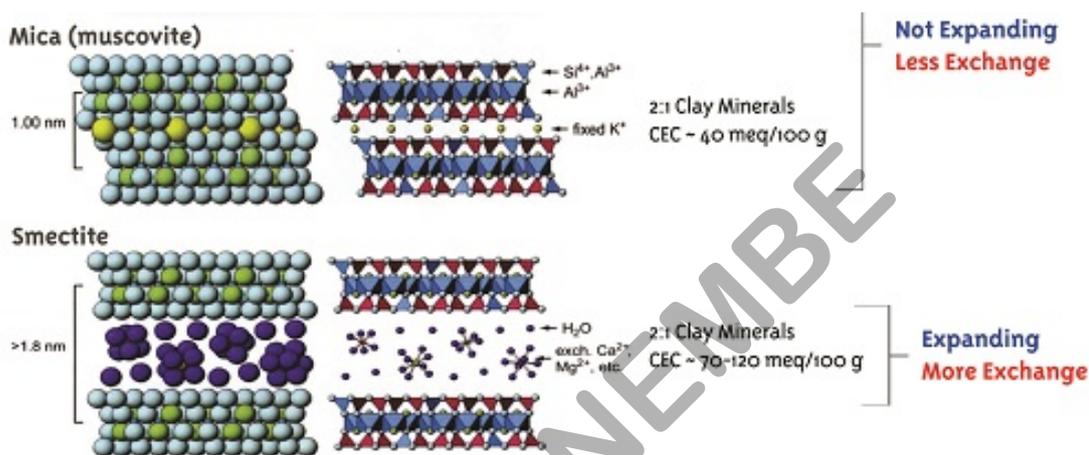
Filosilicatos 1:1. Bilaminares. (-T:O-) La estructura básica está formada por una capa tetraédrica y una capa octaédrica. La unión de los elementos dentro de la capa es muy fuerte y entre capa y capa más débil (enlaces Van der Waals).



Fuente: <http://soils.ifas.ufl.edu/wgharris/SEED/Htm.images/kaolinitestructure.htm>

Filosilicatos 2:1. Trilaminares. (-T:O:T-) La estructura básica está formada por dos capas tetraédricas y una capa octaédrica, la cual puede ser:

- Dioctaédrica: si solamente están ocupadas dos tercios de las posiciones octaédricas y el tercio restante está vacante, el Al^{3+} es el dominante. Ejemplos de minerales que presentan esta estructura: Illitas, Micas, **Esmectitas** como la Montmorillonita y la nontronita.
- Trioctaédrica: si todos los huecos octaédricos están ocupados y el Mg^{2+} es el catión dominante en el octaedro. Por ejemplo, el Talco y **Esmectitas** como la Saponita.

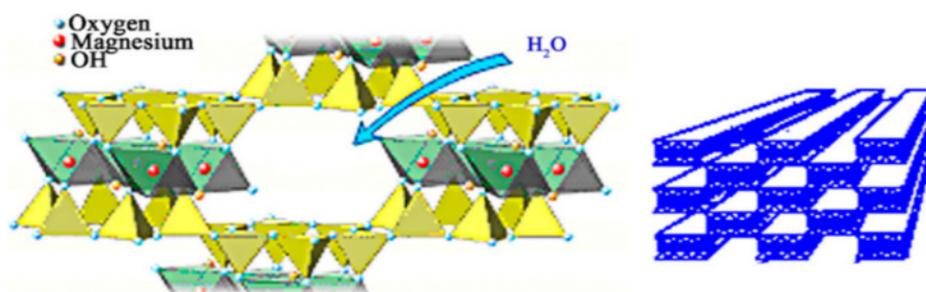


Fuente: <http://www.soils4teachers.org/mineralogy>

Los oxígenos de las capas tetraédricas que se disponen arriba y abajo de la capa octaédrica en las estructuras tipo 2:1 se distribuyen formando hexágonos con un hueco central.

Los filosilicatos fibrosos tienen estructura trilaminar (-T:O:T-) con la particularidad de que los tetraedros de Sílice alternan su orientación a ambos lados de la capa tetraédrica. *Por ejemplo, la Sepiolita.*

Esta configuración estructural le dota de una gran capacidad absorbente y una menor capacidad de intercambio catiónico.



Fuente: <http://www.mdpi.com/1420-3049/19/8/11419/htm>

7.2.- Características de los filosilicatos

Las propiedades físico-químicas de los filosilicatos derivan principalmente de:

- ✓ Su pequeño tamaño de partícula ($< 2 \mu\text{m}$).
- ✓ Su estructura laminar.
- ✓ Las sustituciones isomórficas que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

La sustitución isomórfica es la sustitución de un ion en la red cristalina por otro ion de tamaño similar, de manera que no hay alteración de la estructura cristalina (por ejemplo, se sustituye Al^{3+} por Mg^{2+} o Fe^{2+}).

Esta sustitución, que se puede dar en la capa octaédrica o tetraédrica, genera una deficiencia de carga por lo que permite la unión de otros cationes para compensarse eléctricamente.

Como consecuencia de estas características, los Filosilicatos presentan, por una parte, un valor elevado del área superficial y, a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interactuar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares.

8.- PRINCIPALES PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS DE LOS FILOSILICATOS

8.1.- Superficie específica

La superficie específica o área superficial se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m^2/g . Cuanta más superficie específica tenga el mineral, mayor es su superficie de contacto.

A continuación, se muestran algunos ejemplos de superficies específicas:

Minerales	Superficies específicas, m^2/g
Caolinita (1:1)	10-30
Illita (2:1)	hasta 50
Montmorillonita (2:1)	80-100
Sepiolita (Fibroso)	100-240 (350)
Vermiculitas (2:1)	Hasta 400
Zeolitas (túnel)	Hasta 1.000

8.2.-Capacidad de Intercambio Catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- Sustituciones isomórficas dentro de la estructura, conocido como carga permanente (supone entre el 75%-85% de la carga neta de la partícula y es independiente del pH y de la actividad iónica del medio).
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas (que varía en función del pH y de la actividad iónica).
- Disociación de los grupos hidroxilos accesibles (que varía en función del pH y de la actividad iónica).

La capacidad de intercambio catiónico varía de un Filosilicato a otro y se relaciona directamente con las características estructurales antes señaladas anteriormente.

- ✓ *Los Bilaminares.* (-T:O-) tipo 1:1 el armazón TO-TO-.se sustenta mediante enlaces tipo puente de hidrógeno, entre los grupos (OH) de las capas octaédricas y los oxígenos de las tetraédricas. Este enlace es lo suficientemente fuerte como para mantener la estructura global y al mismo tiempo impedir la entrada de cationes entre capas.
- ✓ *Los Trilaminares.* (-T:O:T-) tipo 2:1 este tipo de enlace entre capas no es posible (se enfrentan capas tetraédricas). En este caso el armazón estructural se compensa eléctricamente introduciendo cationes interlaminares.

En el subgrupo de Filosilicatos, llamados **Esmectitas**, se producen múltiples sustituciones en las capas octaédricas y tetraédricas, que le confieren una carga global negativa. Debido a esta descompensación de cargas pueden adsorber cationes o moléculas (especialmente compuestos polares).

A continuación, se muestran algunos ejemplos de capacidad de intercambio catiónico:

Minerales	CIC (en meq/100 g)
Caolinita (1:1)	3-5
Sepiolita (Fibroso)	20-35
Illita (2:1)	10-50
Montmorillonita (2:1)	80-200
Vermiculita (2:1)	100-200
Zeolitas (túnel)	200-1000

8.3.- Capacidad de Absorción

Absorción: proceso por el cual las moléculas o átomos de una fase interpenetran casi uniformemente en los de la otra fase.

La capacidad de absorción está relacionada con: la superficie específica y la porosidad.

- ✓ Grupo de las Esmectitas: absorción de agua u otras moléculas en el espacio interlaminar.
- ✓ Grupo de la Sepiolita: absorción de agua u otras moléculas en los canales estructurales.

8.4.- Hidratación

Propiedades características de algunos filosilicatos (Esmectitas). El grado de hidratación está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras.

Una vez que se han definido el grupo de minerales Filosilicatos y sus propiedades, es importante aclarar varios términos como Arcillas, Bentonita o HSCAS, que se utilizan con frecuencia, pero en ocasiones no quedan totalmente clarificados.

Arcillas. Una de las definiciones posibles es: grupo de minerales constituido principalmente por Filosilicatos de aluminio hidratados, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y del tamaño de partícula (inferior a 2 μ m). Por lo tanto, existen muchos tipos de arcillas, en función de tipos de filosilicatos que la componen. Las propiedades adsorbentes de las arcillas varían considerablemente en función de los filosilicatos que presenten.

Otro término utilizado con frecuencia es el **HSCAS**, aluminosilicatos hidratados de calcio y sodio. Phillips et al., (1988) lo emplea por primera vez en un estudio para evaluar la capacidad de varios aluminosilicatos, alúminas y sílices para adsorber aflatoxina B1 (AFB1) en solución acuosa (in vitro). En este trabajo las siglas HSCAS se emplean para el producto comercial NovaSil. Posteriormente, la nomenclatura de HSCA ha sido utilizada

por otros autores, pero es una descripción demasiado genérica que no especifica el material utilizado en concreto (especie mineral, natural o tratado de diferentes formas, etc.).

Por último, el término **Bentonita**, que según la definición de Grim (1972) dada en la International Clay Conference, es una arcilla compuesta esencialmente por minerales del grupo de las Esmectitas con independencia de su génesis y modo de aparición, además de otros minerales. Por lo tanto, cuando se define una bentonita, es importante saber el tipo y cantidad de Esmectitas (Montmorillonita, Beidellita, Saponita, etc.), así como el porcentaje de otros minerales presentes (Feldspatos, Cuarzo, etc.).

Muchos estudios, tanto *in vitro* como *in vivo*, han puesto de relieve que los adsorbentes minerales, especialmente los compuestos ricos en Esmectitas, eliminan eficazmente las micotoxinas polares, como las Aflatoxinas (Deng et al, 2014; Di Gregorio et al, 2014; Vekiru et al, 2015).

Estudios *in vivo* también han demostrado que la adición de aluminosilicatos en alimentos de vacas productoras de leche expuestas a AFB1, disminuyeron los niveles de AFM1 en leche. (Rojo et al., 2016),

Dentro del grupo de los Filosilicatos, el mineral perteneciente al grupo de las Esmectitas dioctaédricas denominado Montmorillonita, es el que presenta una afinidad mayor con la Aflatoxina B1. Esto ha sido demostrado por varios autores (Ramos et al., 1997).

La eficiencia de la adsorción de la AFB1 de una bentonita depende fuertemente de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas del tipo de Esmectita de la que esté compuesta. La Esmectitas con carga octaédrica (Montmorillonita y Hectorita) adsorbieron más AFB1 que las Esmectitas con carga en la capa tetraédrica (Nontronita, Saponita). También ha sido demostrado, que la capacidad de adsorción de las Esmectitas está influenciada por la capacidad de intercambio catiónico, existiendo un rango óptimo en el cual es más efectiva la unión con la Aflatoxina B1. (Barrientos-Velázquez et al., 2016).

Se han estudiado los mecanismos de unión de las moléculas de AFB1 con minerales del grupo de arcillas como adsorbentes: Caolinita, Illita y Esmectita, demostrado que el coeficiente de adsorción de las Esmectitas fue significativamente más alto que el de la Illita y la Caolinita, (355-485, 142-158 y 18-37 l/kg respectivamente). Se ha puesto de manifiesto la influencia de la superficie específica de las arcillas en su capacidad de adsorción de AFB1. Se han propuesto diferentes mecanismos de la unión de las moléculas de AFB1 a los tres adsorbentes estudiados. En el caso de la Esmectita se consigue el enlace más fuerte a través de los cationes de Ca^{2+} de la Esmectita. (Kang et al., 2016).

Otros autores han demostrado que los aluminosilicatos de sodio y calcio (HSCAS), son inocuos para animales y humanos (Adegoke et al., 2013, Rivas et al., 2016).

El uso de aluminosilicatos es más frecuente en la adsorción de la Aflatoxina, aunque se han probado con otras micotoxinas con poco éxito, debido a que su superficie hidrófila es menos eficaz en la adsorción de micotoxinas no polares (Hauschild et al., 2007).

El ensayo realizado por Kong et al. (2014) para determinar la eficacia de varios agentes secuestrantes de micotoxinas, determino que la eficacia en la adsorción de las bentonitas estudiadas para la Aflatoxina B1 fue muy alta (media de 92,5%) mientras que los valores obtenidos para el Deoxinivalenol (DON) fueron muy bajos (3,24%).

La capacidad de adsorción de algunos productos minerales ricos en Esmectitas con un valor de cenizas mayores de 90% han mostrado una adsorción de ZEA en soluciones tampón de aproximadamente un 40%, y de 15% de ZEA en el jugo gástrico. (Fruhauf et al., 2012).

El uso de bentonitas comerciales en los piensos no afecta al rendimiento productivo de los animales. (Neeff et al., 2013).

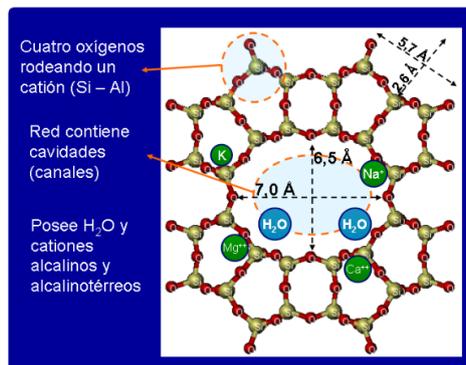
Los adsorbentes minerales modificados han mostrado ser más eficientes en el caso de las micotoxinas hidrofóbicas con pKa superiores; tales como el ZEA y OTA. (Dakovic et al., 2003; Feng et al., 2008). La incorporación de ácidos orgánicos de cadena larga en la superficie de los aluminosilicatos (organoaluminosilicatos) ha resultado en que la superficie de mineral presente una mayor hidrofobicidad, lo que aumenta la afinidad para las moléculas no polares y la reducción de la adsorción de moléculas hidrófilas (Dakovic et al., 2005). Los organoaluminosilicatos pueden adsorber micotoxinas de baja polaridad, como Zearalenona. (Hauschild et al., 2007).

9.- TECTOSILICATOS

Grupo de minerales formados por tetraedros de SiO_4 unidos por sus cuatro vértices a otros tetraedros, produciendo una red compleja de extensión tridimensional. Los minerales de este grupo son abundantes y representan cerca de un 64% de la corteza terrestre, entre ellos, por sus características adsorbentes, destacamos el subgrupo de las **Zeolitas**.

9.1.- Zeolitas

Las zeolitas comprenden un grupo de aluminosilicatos cristalinos e hidratados de aluminio, con cationes alcalinos y alcalino-térreos y con una ordenación tridimensional (tectosilicatos), donde predomina una estructura abierta, que les aporta gran capacidad para incorporar y ceder agua y cationes. (Costafreda Mustelier, 2014).



Esquema de las moléculas que forman la celda unitaria de la mordenita (ex: <http://crystals.ethz.ch/IZA-SC/3D-images/FWviewer.php#>)

En su estructura las zeolitas presentan canales y cavidades de dimensiones variables, en los cuales, además de moléculas de agua, adsorbatos y sales, se encuentran los cationes de compensación. Este tipo de estructura microporosa hace que las Zeolitas presenten una superficie interna extremadamente grande en relación a su superficie externa (Bosch y Schifter, 1997).

La microporosidad y las características estructurales de estos minerales permiten la transferencia de materia entre el espacio intracrystalino y el medio circundante, adsorbiendo eficazmente moléculas polares; esta transferencia está condicionada por el diámetro de los poros, por lo que sólo podrán entrar o salir del espacio intracrystalino aquellas moléculas cuyas dimensiones sean inferiores a un cierto valor crítico, el cual varía de una zeolita a otra (Demuth et al., 2000).

Entre las características generales de las zeolitas están las siguientes:

- Elevada superficie específica.
- Capacidad de intercambio catiónico.
- Capacidad de adsorción.
- Estabilidad térmica.

La sustitución de silicio por aluminio en algunos tetraedros induce cargas negativas en la estructura, las cuales se neutralizan por cationes intercambiables. La capacidad de intercambio catiónico en la Zeolitas depende de su naturaleza, composición química, pH y temperatura de la solución, así como de las características del catión que se intercambia. (Ramos et al., 2004)

Entre las zeolitas naturales conocidas destacan la Clinoptilolita, la Chabazita, la Mordenita, Erionita y Ferrierita.

Las zeolitas naturales presentan un problema fundamental, y es su escasa calidad, debido a que son minerales extraídos de yacimientos y son heterogéneos en sus propiedades físicas y químicas, por lo que es necesaria su purificación.

Muchos autores han estudiado la capacidad adsorbente de las zeolitas. Vekiru et al. (2015) realizaron un estudio, *in vitro* e *in vivo*, para determinar la eficacia de una zeolita (componente principal clinoptilolita) como adsorbente de AFB1. La zeolita presentó una capacidad de absorción baja *in vitro*, y pH dependiente. La capacidad de adsorción más alta se obtuvo a pH 7 (21,9%). Los resultados fueron corroborados en el estudio realizado *in vivo* en pollos. Este estudio contradice otros, en los que la zeolita mostró una capacidad de adsorción mayor. Según Marroquín-Cardona et al. (2009) esto podría ser debido al tamaño de los poros de las zeolitas. La clinoptilolita natural tiene un tamaño de poro de 4-7 Å, tamaño pequeño en comparación con el de la AFB1 (10.4 a 12.8 Å), lo que limita la adsorción solamente a la superficie externa.

Al igual que los anteriores autores, el estudio llevado a cabo por Marija A. Markvic et al. (2015), evaluando la adsorción de AFB1 por una montmorillonita y una zeolita natural, a diferentes pH, concluyo que los valores de adsorción de AFB1 con la zeolita fueron muy bajos, (9% y 7%). Mientras que los valores de adsorción utilizando la montmorillonita fueron de entre el 97% (a pH 3) y 82% (a pH 9). Aunque la clinoptilolita presenta una CIC y porosidad mayor que la montmorillonita, se demuestra que la AFB1 se adsorbe únicamente en la parte externa de la clinoptilolita, mientras que en la montmorillonita se adsorbe en todos los sitios activos disponibles.

En contraposición a los anteriores autores, el estudio de Katsoulos et al. (2016) demostró que la administración de clinoptilolita (riqueza del 85% zeolita natural) a razón de 200 gr/por vaca y día, redujo significativamente la AFB1 en leche una tasa promedio del 56,2%. El estudio se llevó a cabo con 2 tamaños de particular diferentes, siendo la que tenía un tamaño menor la que obtuvo mejores resultados, verificando así, lo estipulado por Marroquín-Cardona et al. (2009).

Los resultados presentados confirman el hecho de que las diferencias en la estructura de los minerales (Aluminosilicatos) conducen a su diferente eficacia para la adsorción de micotoxinas. La especie mineral, la capacidad de intercambio catiónico, el tamaño del poro y la superficie específica son parámetros muy importantes que influyen en la eficacia de los minerales como adsorbente de micotoxinas.

10.- OTROS ADSORBENTES

10.1.- Carbón activado

El Carbón Activado (CA) es polvo insoluble formado por pirólisis de varios compuestos orgánicos, que presenta una estructura muy porosa y elevada superficie

específica (500-3.500 m²/gr). La capacidad adsorbente del CA depende de muchos factores, incluyendo el tamaño del poro, área superficial, la estructura de la micotoxina y la dosis.

El CA ha sido probado por varios estudios como un efectivo adsorbente de las micotoxinas DON, ZEA, AFB1, FB1 y OTA (Avantaggiato et al., 2004; Devreese et al., 2012; Huwig et al., 2001).

El estudio *in vitro* realizado por Avantaggiato et al. (2004) para evaluar la capacidad de absorción de CA, utilizando un modelo gastrointestinal que simulaba los procesos metabólicos demostró que, la inclusión del CA produjo una reducción significativa en la absorción de DON y NIV.

La capacidad del CA para adsorber la Fumonisina B1 en soluciones acuosas se ha demostrado *in vitro*, pero no fue efectiva en experimentos *in vivo*. (Mayra Carraro Di Gregorio et al., 2014).

El principal inconveniente en el uso del CA es su escasa selectividad. Por lo tanto, los nutrientes esenciales, tales como vitaminas y minerales, también son adsorbidos, y en particular, si sus concentraciones en la alimentación son mucho más altos en comparación con los de la micotoxina (Avantaggiato et al., 2004; Ramos et al., 1996) (Huwig et al., 2001).

10.2.- Tierra de diatomeas

La Tierra de Diatomeas es mineral de origen vegetal formado por la fosilización y acumulación de los esqueletos provenientes de algas unicelulares. Este material presenta una estructura porosa, un área de superficie alta, baja densidad y conductividad y una microestructura compuesta principalmente de sílice amorfa y otros componentes, tales como alúmina, hierro, calcio, magnesio, sodio, potasio, titanio y otros, en proporciones más pequeñas.

La aplicación industrial de la tierra de diatomeas dependerá del grado de pureza y de la cantidad de sílice presente. Se han usado contra diferentes plagas por su capacidad insecticida físico-mecánico. También para la protección de los granos almacenados, como quelante de metales pesados y contaminantes orgánicos.

El trabajo realizado por Modirsanei et al. (2008) demostró que la tierra de diatomeas redujo algunos de los efectos tóxicos de la AFB1 en pollos de engorde.

En comparación con arcillas ricas en Esmectitas (Montmorillonita), o minerales zeolíticos, la tierra de diatomeas tiene bajas propiedades de adsorción con respecto a las Aflatoxinas. (Kolossova et al., 2010).

La detoxificación de Zearalenona con tierra de diatomeas y talco, en una simulación de ácidos gástricos sintéticos, mostró que la superficie de la tierra de diatomeas es más hidrófila que el talco, siendo más efectiva la adsorción de ZEA por el talco. La capacidad de adsorción más baja de ZEA en la tierra de diatomeas es aparentemente debida a la predominancia de grupos silanol sobre los siloxanos en la superficie activa. La adsorción de las moléculas de ZEA en la superficie de silanol de la tierra de diatomeas está limitada por la competencia de moléculas de toxina menos polares con las fuertes moléculas polares de agua. (Sprynsky et al., 2012)

El poder de adsorción de la tierra de diatomeas es débil, por lo que es necesario someterla a tratamientos químicos con el fin de modificar y mejorar esta capacidad.

11.- AGENTES ADSORBENTES ORGÁNICOS

11.1.- Paredes celulares de levaduras

Las paredes celulares de levaduras se obtienen principalmente de *Saccharomyces cerevisiae*. Los principales componentes de la pared celular son las mananoproteínas y los β -glucanos con un porcentaje pequeño de quitina (4%).

La capa interna de la pared celular está unida a la membrana plasmática por quitina, mientras que la capa exterior de la pared está compuesta por mananoproteínas cuya función es el intercambio de moléculas con el ambiente externo.

Estos adsorbentes de micotoxinas derivados de la pared celular de las levaduras *Saccharomyces cerevisiae* están compuestos de β -glucanos y manano oligosacáridos.

Además de las paredes celulares de levaduras, también se ha empleado en la desintoxicación de micotoxinas glucomananos esterificados, obtenidos por la esterificación de las paredes de *Saccharomyces cerevisiae*. Las micotoxinas serían atrapadas en la matriz del glucomannano en el tracto gastrointestinal, lo que impediría su posterior absorción.

La capacidad de adsorción de la Zearalenona por los β -D-glucanos aislados de *Saccharomyces cerevisiae* fue reportada por Alexandros Yiannikouris et al. (2004), demostrando que existe una correlación entre la cantidad de β -D-glucanos de la pared celular y la eficacia formadora del complejo. Las paredes celulares de las cepas que tienen niveles más altos de β -D-glucanos, fueron capaces de acomplejar más Zearalenona. Demostrando así, que la fracción β -D-glucano de la pared celular está directamente involucrada en el proceso de unión con ZEA, y que la organización estructural de β -D-glucanos modula la fuerza de unión.

La cinética de la interacción de los β -D-glucanos con otras micotoxinas ha sido estudiada *in vitro*, a diferentes pH y simulando las diferentes condiciones que se encuentran a lo largo del tracto digestivo. Los resultados obtenidos demostraron que las condiciones ácidas y neutras dieron las mayores tasas de afinidad para las Aflatoxinas B1 > Deoxinivalenol > Ocratoxina A, estando involucrados en este proceso los (1 \rightarrow 3) - β -D-glucanos y los (1 \rightarrow 6) - β -D-glucanos. En condiciones alcalinas, fueron favorables sólo para la adsorción de Patulina. Usando mecanismos moleculares, encontraron que los grupos hidroxilo, cetona, y lactona están involucrados en la formación de los dos enlaces de hidrógeno e interacciones de Van der Waals entre las Aflatoxinas B1, Deoxinivalenol y Patulina, y β -D-glucanos. Las diferencias en la capacidad de unión de las micotoxinas son debidas a sus características físicas y químicas específicas. (Alexandros Yiannikouris et al., 2006).

En el estudio realizado por Pan D. et al. (2016), se observó una baja capacidad de unión de la Aflatoxina con los productos a base de glucomanos, siendo estos datos diferentes a los obtenidos por otros autores. Según la autora la baja capacidad de adsorción podría ser explicada, por el bajo contenido en cenizas del producto a base de glucomanos. Basándose en el estudio de Fruhauf et al. (2012) en los que demostraron que para la mayoría de los productos testados (30 a base de pared celular de levadura comercialmente disponibles), la eficacia de unión de AFB1 estaba correlacionada con el contenido de cenizas. Los productos que contienen > 30% de cenizas mostraron valores de adsorción de AFB1 elevados, mientras que la mayoría de los productos con < 10% de cenizas no excedieron tasas de adsorción de 20%.

Sobre la base de ensayos *in vitro*, los glucomanos han demostrado que se unen de manera efectiva DON, toxina T-2, ZEA, OTA y la AFB1 (Bejaoui et al., 2004, Freimund et al., 2003; Yiannikouris et al., 2004; Yiannikouris et al., 2006). También han sido demostrados por varios autores los efectos protectores de los GMA contra las consecuencias perjudiciales de las micotoxinas. (Devreese et al., 2013).

11.2.- Fibras micronizadas

Las fibras micronizadas pueden ser obtenidas de diferentes plantas como cereales, alfalfa, manzana, bambu, etc. Están constituidas principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina. (EFSA, 2009).

Una ventaja importante de esta formulación de origen vegetal es que probablemente, sea mejor tolerada por los animales, en comparación con los adsorbentes minerales y microbiológicos, debido a la inherente similitud con componentes de alimentación. (Tranquil et al., 2013).

El estudio realizado por Aoudia et al. (2009) para determinar la capacidad de las fibras de trigo micronizadas para disminuir los niveles de Ocratoxina A (OTA) en el

plasma, riñón e hígado de los lechones alimentados con una dieta contaminada de manera natural, demostró un efecto protector significativo de las fibras en términos de concentración de OTA en el plasma. Los resultados sugirieron que la adición de las fibras fue eficaz en la disminución de la biodisponibilidad de OTA de dietas contaminadas en los lechones.

En 2013, se presentó y patentó un método de adsorción utilizando materiales lignocelulósicos modificados por proteínas ambivalentes (Tranquil et al., 2013). Las materias lignocelulósicas se obtuvieron a partir de cereales, leguminosas y subproductos como granos de destilería, bagazos de cerveza, torta de girasol, pulpa de remolacha, bagazo de caña y fueron tratados por medios mecánicos (micronización) y tratamientos químicos (enzima) para aumentar el contenido de hemicelulosa, área de adsorción, y hidrofobicidad de la superficie. Los componentes lignocelulósicos vegetales modificados mostraron una buena detoxificación de DON, T-2 y OTA.

El uso de extractos de plantas naturales puede también proporcionar una forma alternativa, para evitar la contaminación de los alimentos o piensos por hongos o por micotoxinas.

La planta *Corymbia citriodora*, está siendo estudiada por su potencial de detoxificación de Aflatoxinas. Los estudios realizados *in vitro* e *in vivo*, a diferentes temperaturas, pH y tiempo de incubación, indicaron que el extracto de las hojas de *C. citriodora* degradan con mayor eficacia la Aflatoxina B1 y la B2 (95.21% y 92.95%), respectivamente en metabolitos menos tóxicos, debido a la eliminación de doble enlace en el anillo terminal del furano. (Iram et al., 2015)

El extracto de semilla de Ajowan (*Trachyspermum Ammi (L.) Sprague ex Turrrill*) también ha mostrado la degradación de AFG1, (hasta 65%). El extracto de *T. Ammi* dializada fue más eficaz que el extracto crudo, capaz de degradar más del 90% de la toxina, se mostró que la degradación de más del 78% se produjo dentro de 6 horas y el 91% de degradación se produjo 24 horas después de la incubación. (Velazhahan et al., 2010).

Los extractos de plantas podrían proporcionar un método biológicamente seguro para proteger a los animales de las de las contaminaciones por micotoxinas, siendo necesaria la realización de más estudios.

11.3.- Ácidos húmicos

Los Ácidos Húmicos se forman a través de la humificación química y biológica de la materia orgánica, en particular de plantas y a través de las actividades biológicas de los microorganismos. Las sustancias húmicas tienen una fuerte afinidad para unirse a diversas sustancias, tales como metales pesados, herbicidas y compuestos aromáticos policíclicos y minerales.

Algunas sustancias húmicas y sus sales se han descrito para interactuar directamente con las micotoxinas, por su capacidad de fijación a las mismas. Jansen Van Rensburg et al. (2006) evaluaron la eficacia *in vivo* de un ácido húmico, Oxihumato (ácidos húmicos a partir de carbón bituminoso) como un adsorbente de Aflatoxinas en los pollos de engorde. El Oxihumato fue eficaz en la disminución de los efectos adversos causados por la Aflatoxina en los pollos de engorde y también mostró efectos protectores contra el daño al hígado, estómago y el agrandamiento del corazón, asociados con la toxicidad Aflatoxina.

El Humato de Sodio tiene el potencial como adsorbente AFB₁, y no secuestra otros nutrientes; siendo el complejo Humato-AFB₁ muy estable a diferentes pH. (Sheng-Qun Ye et al., 2009).

La fuerte afinidad que presentan los ácido húmicos para unirse a la ZEA así como la capacidad para inhibir el crecimiento de bacterias y hongos al mismo tiempo fue estudiado por Schoeters et al. (2013).

11.4.- Polímeros

Los Polímeros son otro grupo de captadores de micotoxinas. Los principales polímeros estudiados han sido la colestiramina y la polivinilpirrolidona.

La colestiramina es una resina de intercambio aniónico, insoluble que liga ácidos. Este polímero actúa localmente, y no se absorbe, por lo que se elimina totalmente. Se ha utilizado como fármaco en humanos para adsorber ácidos biliares en el tracto gastrointestinal a fin de reducir el colesterol. Este compuesto se ha demostrado ser un ligante efectivo para FB₁, OTA y ZEA *in vitro* (Avantaggiato et al., 2003, Avantaggiato et al., 2005, Döll et al., 2004, Ramos et al., 1996, Solfrizzo et al., 2001).

La polivinilpirrolidona: polímero anfótero altamente polar y soluble en agua formado por cadenas de múltiples vinilpirrolidonas. La polivinilpirrolidona se une con AFB₁ y ZEA *in vitro* (Alegakis et al., 1999).

Cabe señalar que el costo de los polímeros es muy alto, lo que limita su uso práctico en la alimentación animal (Kolossova y Stroka, 2011).

11.5.- Microorganismos

El uso de microorganismos, tales como bacterias de ácido láctico (LAB), es un nuevo enfoque prometedor para la desintoxicación de las materias primas, piensos y de los alimentos contaminados, ya que permite la eliminación de las micotoxinas en condiciones poco agresivas y preservando las características de los productos.

Las principales cepas que comprende LAB pertenecen a los siguientes cuatro géneros: *Lactococcus*, *Lactobacillus*, *Leuconostoc* y *Pediococcus*.

La capacidad de los probióticos para unirse a las micotoxinas depende de género, especie y cepa, del tipo y concentración de micotoxina del presente en alimento.

Sangsila et al. (2015) estudiaron ocho cepas de *Lactobacillus pentosus* para determinar su potencial para desintoxicar ZEA. Los resultados mostraron que las capacidades de desintoxicación entre las diferentes cepas de *Lb. pentosus* difieren considerablemente y fueron influenciados por la concentración inicial ZEA. Los resultados obtenidos mostraron que varias cepas de *Lb. pentosus* son prometedoras para reducir la contaminación de micotoxinas en productos alimenticios.

El estudio llevado a cabo por Gerbaldo et al. (2012) corrobora que las LAB, *Lactobacillus rhamnosus* L60 y *L. fermentum* L23 son capaces de inhibir el crecimiento del hongo *Aspergillus Flavi*, y por tanto la producción de la AFB1 *in vitro*.

La capacidad de las LAB y de las bacterias del ácido propiónico (PAB) para eliminar micotoxinas de los hongos *Fusarium*, Deoxinivalenol (DON) y las Fumonisinas B1 y B2 (FB1, FB2), ha sido estudiada por Niderkorn et al., (2006), demostrando que los ratios de eliminación de estas micotoxinas eran diferentes entre cepas. 55% de eliminación para DON, 82% para FB1 y 100% para FB2. Otra cepa seleccionada fue capaz de eliminar hasta un 88% Zearalenona. Las cepas PAB fueron menos eficientes que las LAB. El mecanismo de acción de las LAB fue por adsorción ya que no se detectaron derivados de las toxinas. La unión no se vio afectada por el pH, excepto para las Fumonisinas que a pH neutro no fueron adsorbidas. La capacidad de unión de las cepas seleccionadas podría utilizarse para disminuir la biodisponibilidad de las toxinas en los ensilajes contaminados.

La Bacteria *Bacillus licheniformis* CFR1, mostró un porcentaje de reducción de la AFB1 de más de un 90%. El mecanismo de detoxificación podría ser debido a las proteínas extracelulares o enzimas producidas en el medio. *B. licheniformis* CFR1 podría ser un excelente candidato para la desintoxicación de Aflatoxina B1 (Rao et al., 2016).

La evidencia científica muestra que los probióticos unen aflatoxinas estableciendo interacciones reversibles con estas moléculas a través de diversos componentes de su pared celular. Debido a que la interacción es especie y cepa específica, se presume que existen diferencias entre las paredes celulares que son fundamentales para la efectividad de la unión. Sin embargo, hasta el momento, se conoce poco sobre estas diferencias. (Rivas et al., 2016).

La fuerza de la interacción de micotoxinas-LAB está influenciada por la estructura de peptidoglicano y, más precisamente, por su composición de aminoácidos (Dalie et al., 2010).

Es necesario que se realicen más estudios para poder caracterizar la unión LAB-Micotoxina a fin de encontrar la cepa más efectiva.

Actualmente se están realizando numerosos estudios sobre las bacterias ácido lácticas, sin embargo, este tipo de mecanismo de adsorción es reversible en la naturaleza. Un enfoque prometedor podría ser una combinación de ambos, adsorbentes minerales y biológicos para mejorar su eficacia (Poloni et al., 2015).

12.- AGENTES BIOTRANSFORMADORES

Otra estrategia para el control de micotoxicosis en los animales es la degradación microbiana de las micotoxinas en metabolitos no tóxicos mediante el uso de agentes biotransformadores, tales como bacterias, hongos o enzimas. Estas sustancias, no se consideran agentes detoxificadores en su sentido estricto, sin embargo, tales compuestos pueden ser muy eficientes para reducir la toxicidad de las micotoxinas.

La degradación microbiana se ha convertido en una parte importante de las estrategias de detoxificación de micotoxina tanto en la alimentación humana como en la alimentación animal.

Una variedad de especies microbianas, incluidas bacterias, hongos y levaduras han sido reconocidas por su capacidad para la biotransformación de las micotoxinas en metabolitos menos tóxicos a través de rutas tales como por ejemplo la de/acetilación, oxigenación, isomerización, etc.

Es necesario que los agentes biotransformadores, para uso como aditivos en los piensos, cumplan una serie de requisitos como son una degradación rápida en metabolitos no tóxicos (o, al menos, mucho menos tóxicos), que puedan actuar en un entorno complejo, es decir, que sean estables a lo largo del tracto intestinal a diferentes pH y que conserven las propiedades organolépticas y nutritivas de los alimentos, además de que sean viables económicamente.

12.1.- Microorganismos

Bacterias

Las bacterias utilizadas como agentes biotransformadores de micotoxinas, han sido aisladas de diversas matrices, tales como el rumen, microbiota intestinal, el suelo e incluso agua. (Devreese et al., 2013). Entre las bacterias que se están estudiando son *Eubacterium* BBSH, *Bacillus* sp., *Corynebacterium rubrum*, *Norcadia corynebacterioides*, *Cellulosimicrobium funkei*, *Rhodococcus* sp.

La cepa *Eubacterium* BBSH 797 es la que más ampliamente está siendo investigada por su capacidad de degradación de micotoxinas. Esta cepa fue aislada de fluido ruminal bovino y el modo de acción se demostró *in vitro* y también *in vivo* (Schatzmayr et al., 2006).

La cepa *Eubacterium* BBSH 797 es capaz de desactivar los tricotecenos por la reducción del anillo epóxido, transforma el deoxinivalenol (DON) en su metabolito DOM-1, actuando en el intestino delgado antes de la resorción de los tricotecenos. (Fuchs et al., 2010).

Otra bacteria sobre la que se están centrando los estudios es *Cellulosimicrobium funkei*, que ha demostrado mejoras significativas en la capacidad de biodegradación de AFB1 (eliminación 97%) tanto *in vitro* como *in vivo*. La suplementación de *C. funkei* alivió los efectos adversos de AFB1 sobre el crecimiento en patos, y proporcionó efectos protectores sobre los indicadores bioquímicos séricos y la disminución de la lesión hepática producida por la AFB1. El uso de *C. funkei* en alimentos contaminados por AFB1, ofrece una nueva estrategia para reducir los efectos adversos de la aflatoxicosis. (Sun et al., 2015).

Tres especies de *Actinomycete*, *Rhodococcus erythropolis* (BACTERIA GRAM+) ATCC 4277, *Streptomyces lividans* y *S. aureofaciens aureofaciens* ATCC 10762 han sido capaces de degradar la AFB1, esta degradación fue dependiente del pH y de la temperatura. (Manal Eshelli et al., 2015).

La bacteria *Pediococcus parvulus*, aislada en el vino, fue capaz de biodegradar la Ocratoxina a través de la hidrólisis del enlace amida que une la molécula de L-β-fenilalanina en la OTα, un compuesto no tóxico (Abrunhosa et al., 2014).

La degradación microbiana de las Aflatoxinas ha sido ampliamente estudiada y ahora es un área muy prometedora de la investigación. (Adebo et al., 2015).

Levaduras: *Trichosporon mycotoxinivorans*, *Saccharomices* sp.

La levadura *Trichosporon mycotoxinivorans* (TRM), encontrada en el intestino de la termita *Mastotermes darwiniensis*, es capaz para degradar la Ocratoxina A y Zearalenona, en metabolitos menos tóxicos. En el estudio se pudo observar que al cabo de 2,5 horas toda la Ocratoxina A había sido desactivada por *T. mycotoxinivorans*, mientras que la degradación de la ZAE ocurre después de 24 horas de incubación (Orsolya Molnar et al., 2004).

El uso de *T. mycotoxinivorans* como biotransformador de la micotoxina puede ser prometedor, pero el principal inconveniente es que la degradación de las micotoxinas debe ocurrir rápidamente después de la ingestión, no ocurriendo esto en el caso de la ZEA.

Posteriormente, Politis et al. (2005), realizaron un estudio para determinar si la inclusión en la dieta de *Trichosporon mycotoxinivorans* podría suprimir los efectos perjudiciales de la ocratoxina A (OTA) en el sistema inmune de los pollos de engorde, demostrando que TRM bloqueó por completo todos los efectos negativos de OTA en el sistema inmune de los pollos de engorde.

Hongos: *Aspergillus niger*, *A. flavus*, *Trichomonascus* sp., *Rhizopus*

Los hongos no sólo pueden producir micotoxinas, algunos de ellos también son capaces de degradarlas. Las cepas de hongos *Aspergillus niger*, *Aspergillus flavus*, *Eurotium herbariorum* y *Rhizopus* sp. son capaces de convertir la AFB1 a Atoxicol AFL mediante la reducción del carbonilo de ciclopentenona de la aflatoxina B1 (Wu et al., 2009).

Ha sido demostrado que *Aspergillus niger* puede degradar AFB1. Una cepa no toxigénica, aislada en soja fermentada, llamada *Aspergillus niger* FS10 se evaluó por su capacidad para detener la producción de AFB1 in vitro. Este filtrado podría aplicarse en alimentos fermentados, como un agente biológico seguro, eficaz y económico, para evitar la toxigénica por *Aspergillus* spp. y la contaminación de aflatoxina B1 (Xu, Wang, Zhang, Yang, y Sun, 2013).

Aspergillus niger también es capaz de degradar OTA al compuesto menos tóxico alfa-ocratoxina (OT α) (Devreese et al., 2013).

La levadura *Pseudomonas putida* es capaz de degradar AFB1, que podría ser debido a la apertura del anillo de lactona, según los autores del estudio, la hipótesis es que la desintoxicación de AFB1 produciría la Aflatoxina D1, un compuesto menos tóxico. (Samuel et al., 2014).

12.2.- Enzimas

Una alternativa al uso de microorganismos vivos para la detoxificación de los alimentos es la aplicación de enzimas para degradar las micotoxinas. Las reacciones enzimáticas ofrecen una manera de detoxificar, específica, eficiente y respetuosa con el medio ambiente, y a menudo irreversible, que no deja residuos tóxicos o subproductos no deseados (Kolossova y Stroka, 2011).

Epoxidases

Epoxidases son enzimas producida por la cepa de *Eubacterium* BBSH 797 que son capaces de desintoxicar tricotecenos por la transformación de su grupo epoxi. El modo de acción de esta cepa ha sido demostrado *in vitro* e *in vivo* por varios autores. (Binder, 2007; He et al, 2010; Schatzmayr et al., 2006; Kolossova y Stroka, 2011).

Lactonohidrolasas

Lactonohidrolasas son enzimas que catalizan la hidrólisis de los anillos de lactona (ésteres cíclicos intramoleculares) para producir un grupo hidroxilo y un grupo carboxilo (Takahashi -Ando et al., 2002).

Takahashi-Ando et al. (2002) purificaron una nueva enzima, *Lactonohidrolasas*, originada a partir del hongo *Clonostachys rosea* IFO 7063, que es el responsable de la decodificación ZEA, y realizaron la clonación y caracterización del gen que codifica esta enzima (ZHD101). Aunque la actividad de la enzima fue máxima a pH 9 ± 10 , se mostró que ZHD101 todavía era capaz de degradar la micotoxina a pH 7. La zearalenona (ZEN) se convirtió en un producto mucho menos estrogénico.

Proteasas

Las proteasas son enzimas que descomponen las proteínas (proteólisis), por hidrólisis de los enlaces peptídicos que unen los aminoácidos juntos en la cadena polipeptídica. Las proteasas funcionan mejor en condiciones ácidas.

Las Proteasas de origen fúngico, se obtienen principalmente del *Aspergillus niger*, a través de procesos de fermentación (Abrunhosa et al., 2006). Abrunhosa et al., (2006) informaron de la capacidad de varias proteasas comerciales para hidrolizar OTA en OT α . Después de un período de incubación de 25 horas, detectaron una actividad hidrolítica significativa a pH 7,5 para proteasa A (87,3%) y para la pancreatina (43,4%).

Pancreatina

La pancreatina es una mezcla de varias enzimas pancreáticas producidos por las células exocrinas del páncreas. Se compone de tripsina, amilasa, lipasa y proteasa (Abrunhosa et al., 2006).

Carboxipeptidasa A

La carboxipeptidasa es una metaloexopeptidasa que se encuentra en el páncreas cuya función biológica es catalizar la hidrólisis del enlace peptídico C-terminal de sustratos polipeptídicos, exhibiendo una preferencia específica cuando el aminoácido C-terminal contiene grupos hidrofóbicos voluminosos, como la fenilalanina.

Carboxipeptidasa A por lo general se refiere a la exopeptidase pancreática que hidroliza los enlaces peptídicos de los residuos C-terminales con cadenas laterales aromáticas o alifáticos. (Schatzmayr et al., 2006).

Pitout (1969) realizó un trabajo con el objeto es estudiar la hidrólisis de Ocratoxina A por las enzimas tripsina, quimotripsina y carboxipeptidasa A, comprobando que OTA es hidrolizada por la carboxipeptidasa y la quimotripsina.

Heinl et al. (2010) estudiaron la degradación de la Fumonisina B1 por dos enzimas bacterianas. Demostraron que la degradación de FB1 constaba de dos vías consecutivas. La primera era la metabolización de la FB1 a HFB1 por una carboxilesterasa, seguido de una aminotransferasa, la desaminación a HFHB1, lo que llevó a un compuesto menos tóxico. Los resultados de este trabajo son un paso hacia un proceso de desintoxicación enzimática de las Fumonisinias en alimentación.

13.- CONCLUSIONES

En esta revisión, se han descrito varios métodos para contrarrestar la producción de micotoxinas y su impacto en la salud de los animales, incluyendo una breve reseña de las estrategias pre y post cosecha.

Es fundamental evitar la contaminación en estas fases, pero una vez que se han producido las micotoxinas, es imprescindible identificar correctamente el contaminante al que nos enfrentamos y conocer el mecanismo de acción de cada uno de los detoxificadores de micotoxinas, para utilizar aquel que mejor se adapte a nuestras necesidades en cada momento, de cara obtener los resultados deseados.

La eficacia de un único compuesto como adsorbente o como biotransformador de micotoxinas puede variar en función de la coexistencia entre micotoxinas, la duración de la exposición, y del nivel de contaminación que presenten los alimentos, además de la dosis empleada, de la especie y estado fisiológico del animal.

La tendencia actual, en el intento de contrarrestar los efectos tóxicos de la presencia de varias micotoxinas, es el uso de los llamados multimodulares, que son la combinación de varios detoxificadores. Con su uso combinado se amplía el nivel de descontaminación con el fin de conseguir alimentos más seguros.

14.- BIBLIOGRAFÍA

- ABRUNHOSA, L., INÊS, A., RODRIGUES, A.I., GUIMARÃES, A., PEREIRA, V.L., PARPOT, P. y VENÂNCIO, A. (2014) *International journal of food microbiology* 188: 45-52.
- ABRUNHOSA, L., SANTOS, L. y VENÂNCIO, A. (2006) *Food Biotechnology* 20(3): 231-242.
- ADEGOKE, G.O. y LETUMA, P. (2013) En: *Mycotoxin and Food Safety in Developing Countries*. H.A. Makun (ed.). InTech. Rijeka, Croatia. pp. 123-136.
- ALEGAKIS, A.K., TSATSAKIS, A.M., SHTILMAN, M.I., LYSOVENKO, D.L. y VLACHONIKOLIS, I.G. (1999) *J Environ Sci Health. B* 34(4): 633-644.

- AOUDIA, N., CALLU, P., GROSJEAN, F. y LARONDELLE, Y. (2009) *Food and chemical toxicology* 47(7), 1485-1489.
- AVANTAGGIATO, G., HAVENAAR, R. y VISCONTI, A. (2004) *Food and Chemical Toxicology*, 42(5): 817-824.
- BARRIENTOS-VELÁZQUEZ, A.L., CARDONA, A.M., LIU, L., PHILLIPS, T. y DENG, Y. (2016) *Applied Clay Science*.
- BINDER, E.M. (2007) *Animal Feed Science and Technology* 133: 149-166
- BOSCH, P. y SCHIFTER, I. (1997) *La zeolita una piedra que hierve*. Fondo de cultura Económica de México. 73 p.
- COSTAFREDA MUSTELIER, J.L. (2014) *Tectosilicatos con características especiales: las zeolitas naturales*. Universidad Politecnica de Madrid, Fundación Gómez Pardo Escuela Superior de Ingenieros de Minas y Energía.
- DAKOVIĆ, A., TOMAŠEVIĆ-ČANOVIĆ, M., DONDUR, V., ROTTINGHAUS, G. E., MEDAKOVIĆ, V. y ZARIĆ, S. (2005) *Colloids and Surfaces B: biointerfaces* 46(1): 20-25.
- DEMUTH, TH., BENCO, L HAFNER, J. y TOULHOAT, H. (2000) *International Journal of Quantum Chemistry* 84: 110-116.
- DENG, Y., LIU, L., VELÁZQUEZ-BARRIENTOS, A.L., SZCZERBA, M. y DIXON, J.B. (2014) En: *Aflatoxin control: safeguarding animal feed with calcium smectite*. B. Dixon, A.L. Velázquez-Barrientos, Y. Deng (ed.), American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Guilford Road, Madison. WI, USA. pp. 27-43.
- DEVREESE, M., OSSELAERE, A., GOOSSENS, J., VANDENBROUCKE, V., DE BAERE, S., EECKHOUT M., DE BACKER, P. y CROUBELS, S. (2012) *Food Additives and Contaminants Part A* 29: 1101-1107.
- DEVREESE, M., DE BACKER, P. y CROUBELS, S. (2013) *Vlaams Diergeneeskundig Tijdschrift* 82(4): 181-190.
- DI GREGORIO, M.C., NEEFF, D.V.D., JAGER, A.V., CORASSIN, C.H., CARÃO, Á.C.D.P., ALBUQUERQUE, R.D. y OLIVEIRA, C.A.F. (2014) *Toxin Reviews* 33(3): 125-135.
- DI NATALE, F., GALLO, M. y NIGRO, R. (2009) *Journal of Food Engineering* 95: 186-191.
- FUCHS, E., BINDER, E.M., HEIDLER, D. y KRSKA, R. (2002) *Food Additives & Contaminants* 19: 379-386.
- FRUHAUF, S., SCHWARTZ, H., OTTNER, F., KRSKA, R. y VEKIRU, E. (2012) *Food Additives & Contaminants: Part A*. 29(2): 217-231.
- GERBALDO, G.A., BARBERIS, C., PASCUAL, L., DALCERO, A. y BARBERIS, L. (2012) *FEMS microbiology letters* 332(1): 27-33.
- HAUSCHILD, L., LOVATTO, P.A., LEHNEN, C.R., CARVALHO, A.D.Á., GARCIA, G.G. y MALLMANN, C.A. (2007) *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 42(2): 219-224.
- HE, J., ZHOU, T., YOUNG, J.C., BOLAND, G.J. y SCOTT, P.M. (2010) *Trends in Food Science and Technology* 21: 67-76.

- HUWIG, A., FREIMUND, S., KÄPPELI, O. y DUTLER, H. (2001) *Toxicology letters* 122(2): 179-188.
- IRAM, W., ANJUM, T., IQBAL, M., GHAFAR, A. y ABBAS, M. (2015) *Mass spectrometric identification and toxicity assessment of degraded products of aflatoxin B1 and B2 by Corymbia citriodora aqueous extracts*. Scientific reports.
- KANG, F., GE, Y., HU, X., GOIKAVI, C., WAIGI, M. G., GAO, Y. y LING, W. (2016) *Journal of Hazardous Materials* 320: 80-87.
- KATSOULOS, P.D., KARATZIA, M.A., BOSCO, C., WOLF, P. y KARATZIAS, H. (2016) *Journal of Animal Science and Technology* 58(1): 24.
- KOLOSOVA, A. y STROKA, J. (2011) *World Mycotoxin Journal* 4(3): 225-256.
- KONG, C., SHIN, S.Y. y KIM, B.G. (2014) *SpringerPlus* 3(1): 1.
- MARKOVIĆ, M.A., DAKOVIĆ, A.S., ROTTINGHAUS, G.E., STOJANOVIĆ, M.D., DONDUR, V.T., KRAGOVIĆ, M.M. y GULIŠIJA, Z.P. (2016) *Hemijska industrija* (00): 58-58.
- MODIRSANEI, M., MANSOORI, B., KHOSRAVI, A.R., KIAEI, M.M., KHAZRAEINIA, P., FARKHOY, M. y MASOUMI, Z. (2008) *Journal of the Science of Food and Agriculture* 88: 626-632
- MOLNAR, O., SCHATZMAYR, G., FUCHS, E. y PRILLINGER, H. (2004) *Systematic and applied microbiology*, 27(6): 661-671.
- NEEFF, D.V., LEDOUX, D.R., ROTTINGHAUS, G.E., BERMUDEZ, A.J., DAKOVIC, A., MURAROLLI, R.A. Y OLIVEIRA, C.A.F. (2013) *Poultry Science* 92: 131 -137.
- NIDERKORN, V., BOUDRA, H. y MORGAVI, D.P. (2006) *Journal of Applied Microbiology* 101(4): 849-856.
- PAN, D., GARCÍA Y SANTOS, C. y BETTUCCI, L. (2016) *Veterinaria (Montevideo)* 52(201): 23-27.
- PHILLIPS, T.D., KUBENA, L.F., HARVEY, R.B., TAYLOR, D.R. y HEIDELBAUGH, N.D. (1988) *Poultry Science* 67(2): 243-247.
- POLITIS, I., FEGEROS, K., NITSCH, S., SCHATZMAYR, G. y KANTAS, D. (2005) *British Poultry Science* 46(1): 58-65.
- POLONI, V., DOGI, C., PEREYRA, C.M., FERNÁNDEZ JURI, M.G., KÖHLER, P., ROSA, C.A.R., DALCERO, A.M. y CAVAGLIERI, L.R. (2015) *Food Addit. Contam. Part A* 32: 970-976.
- RAMOS A.J., FINK-GREMMELS J. y HERNANDEZ, E. (1996) *Journal of Food Protection* 59: 631-641.
- RAMOS, G.A. y HERNÁNDEZ, G.E. (1997) *Revista iberoamericana de micología* 14(2): 72-77.
- RAMOS, R.L., MENDOZA, M.S.B., BARRÓN, J.M. y PIÑA, A.A. (2004) *Rev. Soc. Quím. Méx.* 48: 130-136.
- RAO, K.R., VIPIN, A.V., HARIPRASAD, P., APPAIAH, K.A. y VENKATESWARAN, G. (2017) *Food Control* 71: 234-241.
- RIVAS, S.C.M., CORRAL, R.I.A. y MONTFORT, G.R.C. (2016) *Biotecnia* 18(1): 43-51.

- ROJO, F., PATRICIO MARTÍNEZ, S., ESPINOZA, I., HUGO, V., NATHAL VERA, M.A., DE LUCAS PALACIOS, E. y REYES VELÁZQUEZ, W.P. (2014) *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 5(1): 1-15.
- SAMUEL, M.S., SIVARAMAKRISHNA, A. y MEHTA, A. (2014) *International Biodeterioration & Biodegradation* 86 Part C: 202–20.
- SANGSILA, A., FAUCET-MARQUIS, V., PFOHL-LESZKOWICZ, A. y ITSARANUWAT, P. (2016) *Food Control* 62: 187-192.
- SCHATZMAYR, G., ZEHNER, F., TAUBEL, M., SCHATZMAYR, D., KLIMITSCH, A., LOIBNER, A.P. y BINDER, E.M. (2006) *Molecular Nutrition and Food Research* 50: 543-551
- SCHOETERS, E., LI, Z., VAN DYCK, S.M.O. y LAO, Y. (2013) *Mycotoxin binder*, US Patent Publication No. 8507019 B2.
- SOLFRIZZO, M., VISCONTI, A., AVANTAGGIATO, G., TORRES, A. y CHULZE, S. (2001) *Mycopathologia* 151(3): 147–153
- SPRYNSKY, M., GADZALA-KOPCIUCH, R., NOWAK, K. y BUSZEWSKI, B. (2012) *Colloids Surf B* 94:7-14
- SUN, L.H., ZHANG, N.Y., SUN, R.R., GAO, X., GU, C., KRUMM, C.S. y QI, D.S. (2015) *Microbial biotechnology* 8(3): 490-498.
- TAKAHASHI-ANDO, N., KIMURA, M., KAKEYA, H., OSADA, H. y YAMAGUCHI, I. (2002) *Biochemical Journal* 365: 1-6.
- TRANQUIL, E., KANARSKAYA, Z.A., TIKHOMIROV, D.F. y KANARSKY, A.V. (2013) *Compositions and methods for decontamination of animal feed containing mycotoxins typical for both northern and southern climates*, US Patent Publication No. 8496984 B2.
- VAN RENSBURG, C.J., VAN RENSBURG, C.E.J., VAN RYSSSEN, J.B.J., CASEY, N.H. y ROTTINGHAUS, G.E. (2006) *Poultry Science* 85(9): 1576-1583.
- VEKIRU, E., FRUHAUF, S., RODRIGUES, I., OTTNER, F., KRŠKA, R., SCHATZMAYR, G. y BERMUDEZ, A.J. (2015) *World Mycotoxin Journal* 8(4): 477-488.
- VELAZHAHAN, R., VIJAYANANDRAJ, S., VIJAYASAMUNDEESWARI, A., PARANIDHARAN, V., SAMIYAPPAN, R., IWAMOTO, T. y MUTHUKRISHNAN, S. (2010) *Food Control* 21(5): 719-725.
- WU, Q., JEZKOVA, A., YUAN, Z., PAVLIKOVA, L., DOHNAL, V. y KUČA, K. (2009) *Drug Metabolism Reviews* 41: 1-7.
- XU, D., WANG, H., ZHANG, Y., YANG, Z. y SUN, X. (2013) *Food Control* 32(2): 359-365.
- YE, S.Q., LV, X.Z. y ZHOU, A.G. (2009) *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 3(2): 1296-1300.
- YIANNIKOURIS, A., ANDRÉ, G., POUGHON, L., FRANÇOIS, J., DUSSAP, C.G., JEMINET, G. y JOUANY, J.P. (2006) *Biomacromolecules* 7(4): 1147-1155.
- YIANNIKOURIS, A., FRANÇOIS, J., POUGHON, L., DUSSAP, C.G., BERTIN, G., JEMINET, G. y JOUANY, J.P. (2004) *Journal of Food Protection®* 67(6): 1195-1200.