

La base química del aroma del vino: Un viaje analítico desde las moléculas hasta las sensaciones olfato-gustativas

Vicente Ferreira González

Laboratorio de Análisis del Aroma y Enología

Departamento de Química Analítica, Facultad de Ciencias

Universidad de Zaragoza. 50009 Zaragoza

Premio a la Investigación de la Academia 2007. Sección de Químicas

Resumen

Este trabajo presenta una revisión del conocimiento adquirido acerca de la base química del aroma del vino. Uno de los puntos claves es el sorprendente efecto tampón ejercido por el alcohol y otros componentes volátiles mayoritarios sobre la percepción aromática. Tal sistema tiene la capacidad de impedir la percepción de muchos de los odorantes en él contenidos, particularmente la de aquéllos de características frutales. La capacidad de las distintas moléculas aromáticas para romper dicho tampón y, por tanto, para transmitir al vino una nota aromática diferente, puede ser empleada como un criterio de clasificación de estas moléculas.

A día de hoy se ha descrito la existencia de 14 compuestos químicos capaces de romper el tampón por sí mismos a la concentración a la que pueden ser encontrados de forma natural en vinos sanos. Una segunda forma de romper el tampón es mediante la acción concertada de un conjunto de moléculas que comparten propiedades químicas y aromáticas. Al menos 9 familias de este tipo han podido ser identificadas. En algunos casos, el efecto aromático de la familia sólo se hace patente cuando hay presente una tercera molécula que actuaría como potenciador del aroma. La tercera forma de romper el tampón es mediante la acción concertada de muchas moléculas químicas con cierta similitud en alguno de sus descriptores más genéricos. Por supuesto, el sistema tampón puede ser roto de manera negativa por muchas moléculas que actuarían como “off-flavours” de manera individual o concertada. La forma en la que el sistema tampón se rompe en los distintos vinos es la que determina la complejidad y las características aromáticas del vino.

Los vinos sencillos a menudo tienen un único compuesto impacto que es el que domina su perfil sensorial. Vinos más complejos pueden contener varios aromas

impacto, de manera que la percepción será el resultado de su interacción. Todavía más complejo es el caso de aquellos vinos en los que no hay, propiamente hablando, compuestos impacto, sino que las distintas notas aromáticas son consecuencia de la acción concertada de distintos grupos de moléculas. Algunas de las asociaciones más relevantes causantes de las notas florales o frutales de diversos tipos de vinos han sido recientemente elucidadas y serán brevemente comentadas en este trabajo.

1 Introducción

El vino es un producto de lujo del que el consumidor espera obtener un placer lo suficientemente intenso y sofisticado como para justificar su alto precio. Dicho placer está relacionado con las diferentes sensaciones gustativas, olfativas, táctiles y quemoestésicas producidas durante su consumo. Este conjunto de sensaciones debe estar equilibrado y no debe ser enturbiado por la presencia de ninguna sensación espuria. Por otra parte, todas las sensaciones sentidas durante la degustación están causadas por moléculas químicas, ya que éstas son el objetivo de nuestros sentidos químicos, que son los que después de un complicado procesado cerebral de la información, nos hacen percibir y sentir olores, sabores, texturas y otro tipo de sensaciones denominadas quemoestésicas, como el picante, el “efecto frío” o la astringencia. Por tanto, detrás de la calidad (o de la falta de calidad) de un vino se encontrarán un cierto número de moléculas aromáticas y gustativas, y el mayor reto para el químico del aroma es determinar qué moléculas son éstas y comprender el papel que juegan en la percepción final.

Esta tarea fue acometida por los químicos con intensidad y prontitud y ya hacia el final de los años 80 se habían identificado más de 800 compuestos en la fracción volátil de los vinos (Maarse and Vischer 1989). Sin embargo, y al contrario de lo que pudiera parecer, toda esa información apenas supuso progreso alguno en la comprensión del papel jugado por los compuestos químicos en el aroma del vino, tal y como fue reconocido por uno de los investigadores más relevantes y honestos de aquel tiempo (Etievant 1991). Las razones de ese aparente fracaso fueron tres fundamentalmente. La primera es que los investigadores de aquel tiempo intentaron identificar todas las moléculas presentes en la fracción volátil del vino, en lugar de concentrar sus esfuerzos en aquéllas que realmente pudieran tener la capacidad para llegar a impactar en la pituitaria por concentración y volatilidad. La segunda razón está ligada a la complejidad del aroma y sabor del vino: sólo en algunos casos muy particulares el olor de una molécula única puede ser reconocido de manera explícita en el aroma de un vino. No es sorprendente, por tanto, que los escasos éxitos se hubieran dado en la identificación de malos olores o en la identificación de las moléculas responsables del aroma de algunos vinos con características realmente diferenciales, como es el caso del Moscatel. La tercera razón es que en aquel tiempo era

muy difícil conseguir datos cuantitativos razonablemente exactos de las muchas moléculas aromáticas presentes a bajas concentraciones.

Todas estas limitaciones han sido lenta y progresivamente solventadas en los últimos 10 o 15 años. Por una parte, la aplicación sistemática de las técnicas de Cromatografía de Gases-Olfatometría (GC-O) al estudio del aroma del vino, junto con potentes esquemas de separación e identificación química han hecho posible el cribar, de entre todos los componentes volátiles del vino, aquéllos que realmente tienen la oportunidad de ser activos desde el punto de vista aromático (Guth 1997, Ferreira, et al. 1998, López, et al. 1999, Kotseridis and Baumes 2000, Ferreira, et al. 2002, Lopez, et al. 2003, Cullere, et al. 2004, Escudero, et al. 2004, Campo, et al. 2005). En segundo lugar, también se han hecho grandes progresos en la determinación cuantitativa de algunos importantes aromas presentes en niveles de traza (Allen, et al. 1994, Tominaga, et al. 1998, Ferreira, et al. 2003, Schneider, et al. 2003, Cox, et al. 2005, Culleré, et al. 2006, Ferreira, et al. 2006, Tominaga and Dubourdieu 2006, Campo, et al. 2007, Mateo-Vivaracho, et al. 2007). Finalmente, con dicha información cuantitativa ha sido posible reconstituir el aroma de algunos vinos (Guth 1997, Ferreira, et al. 2002, Escudero, et al. 2004) y comenzar a estudiar los tipos de relaciones que existen entre odorantes (Segurel, et al. 2004, Campo, et al. 2005, Cullere, et al. 2007, Escudero, et al. 2007). Puede decirse, por tanto, que estamos comenzando a comprender la base química del aroma del vino. Los aspectos más relevantes de este conocimiento serán brevemente expuestos en este trabajo.

2 Características sensoriales de la mezcla de alcohol y los componentes mayoritarios de fermentación

El vino, como todas las bebidas alcohólicas producidas por fermentación natural de una disolución azucarada, tiene una composición química muy definida que va a ejercer intensos efectos sobre la percepción de los distintos componentes aromáticos o gustativos. Todas las bebidas alcohólicas naturales son ricas no sólo en alcohol, sino también en los metabolitos más importantes de la fermentación alcohólica, tal y como son los alcoholes superiores o de fusel, ácidos grasos y sus ésteres etílicos, ácidos grasos ramificados y sus ésteres etílicos, acetoina, diacetilo y acetaldehído. La presencia de todos estos componentes en cualquier bebida alcohólica ejerce dos efectos principales:

1. Sobre la solubilidad de los odorantes
2. Sobre el impacto real de los odorantes en nuestro sistema sensorial

En general, la presencia de alcohol y de los otros componentes mayoritarios provoca que la solubilidad de los distintos componentes aromáticos sea mayor en vino de lo que lo es en disoluciones acuosas. Tal aumento de solubilidad, a su vez, provoca que la presión de vapor de los odorantes disminuya. Esto es, hay una reducción de la cantidad de com-

ponente volátil presente en las fases vapor en equilibrio sobre una bebida alcohólica. Esta reducción, sin embargo, no es excesivamente intensa (hasta el 40% según el compuesto) (Tsachaki, et al. 2005). El alcohol también puede mejorar la transferencia de los componentes volátiles a la fase de vapor (en condiciones dinámicas, no en equilibrio), pero este efecto causado por la denominada convección de Marangoni es cancelado por las proteínas y otras macromoléculas del vino, siendo perceptible tan sólo en disoluciones sintéticas o en vinos muy envejecidos (Tsachaky tesis doctoral). Puede decirse, por tanto, que en la mayor parte de los vinos la cantidad de compuesto volátil alcanzando la pituitaria durante la olfacción está por debajo de la que se encuentra en disoluciones acuosas conteniendo cantidades equivalentes de volátiles.

Sin embargo, el mayor efecto del alcohol no es tanto químico-físico sino perceptual. Hay varias experiencias que lo corroboran. Por una parte el alcohol tiene la capacidad de enmascarar o suprimir de manera casi completa las notas frutales de una disolución acuosa de ésteres, tal y como se puede ver en la figura 1 (Escudero, et al. 2007). La figura muestra la intensidad de la nota frutal de disoluciones conteniendo una cantidad fija de 9 ésteres frutales y distintos niveles de alcohol. En agua, el olor de la mezcla se asemejaba al de una bebida de manzana, sin embargo, al aumentar el nivel de alcohol, el carácter a manzana se perdió rápidamente y el carácter frutal de la mezcla se fue haciendo menos perceptible hasta el punto en el que el olor de la disolución de ésteres se hizo prácticamente igual al de una disolución conteniendo agua y alcohol (la referencia).

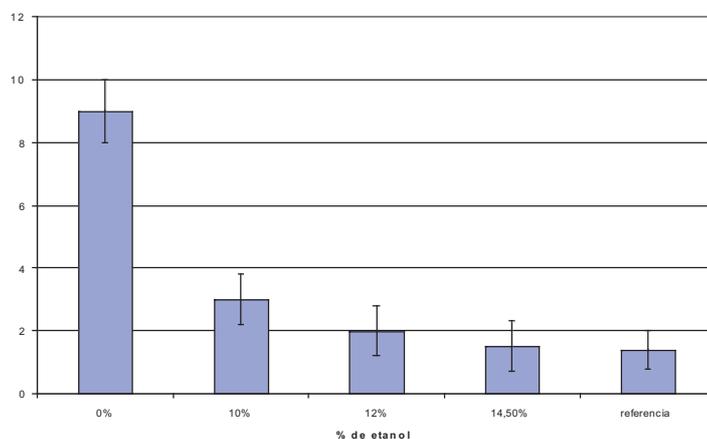


Figura 1.— Efecto del contenido de etanol sobre la intensidad de la nota frutal (medida sensorialmente) de una disolución de ésteres etílicos imitando la concentración encontrada en un vino tinto de alta gama (tomado de Escudero et al, 2007)

Por otra parte, el alcohol también tiene la capacidad de potenciar el olor de algunos otros volátiles, como son el eugenol o el decanal, tal y como se muestra en la figura 2. Estas medidas se tomaron en este caso por Cromatografía de Gas-Olfatometría. Las líneas de puntos representan las medidas olfatométricas realizadas sobre disoluciones conteniendo

tres niveles de concentración diferentes de los dos aromas empleando aire humidificado en el puerto de olfacción. Cuando se añadió una pequeña cantidad de alcohol al humidificador (líneas sólidas), las señales olfativas aumentaron en ambos casos (Pet'ka, et al. 2003). No es posible, con el estado de conocimiento actual, explicar porqué el efecto del alcohol es tan diferente según el componente, pero podría especularse que la presencia de alcohol, que es un tóxico, inhibe la percepción de algunas notas sensoriales relacionadas con productos apetitosos (frutas) y promueve la de algunas otras notas relacionadas con productos de propiedades antisépticas y también tóxicas (especias).

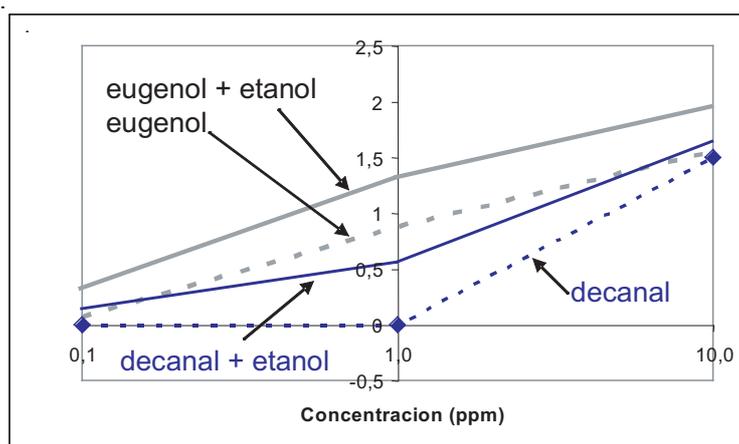


Figura 2.— Efecto de la presencia de etanol en el aire de un olfactómetro sobre la intensidad aromática de disoluciones conteniendo distintas concentraciones de eugenol y decanal

La mezcla de todos los componentes mayoritarios de la fermentación a las concentraciones a las que se encuentran habitualmente en vino tiene el olor típico de bebida alcohólica que habitualmente se define como vinoso. Es un olor ligeramente dulce, picante y agresivo, alcohólico y un poco frutal. Esta mezcla constituye lo que hemos venido en denominar un sistema buffer o tampón aromático. Se le denomina buffer porque su comportamiento con respecto al aroma de algunas sustancias recuerda al comportamiento de los buffer químicos con respecto a los ácidos o las bases. Los buffer de pH tienen la capacidad de contrarrestar el efecto de pequeñas adiciones de ácido o álcali de manera que el pH de la mezcla apenas sufre alteración. De una manera similar, el buffer aromático tiene la capacidad de neutralizar el efecto aromático ligado tanto a la adición de muchas sustancias aromáticas, como a la eliminación de uno de los constituyentes básicos del buffer. Ambos efectos se pueden ver en las tablas 1 y 2. En la tabla 1 (Ferreira, et al. 2002) se muestra el efecto que tiene sobre el aroma de la mezcla la eliminación de uno de sus componentes constitutivos. Debe hacerse notar que todos estos componentes se encontraban a concentraciones claramente por encima de su umbral de percepción. Sin embargo, en la mayor parte de los casos, la omisión del componente de la mezcla no tuvo

efecto sensorial, o si lo tuvo fue tan sutil que los panelistas no fueron capaces de definirlo, tal y como muestran los datos de la tabla. Tan sólo en los casos del acetato de isoamilo y de la β -damascenona, pudo percibirse un ligero efecto sobre la intensidad del carácter frutal de la mezcla.

Compuesto	Signif.	Efecto Cualitativo
isovalerato de etilo	NS	NULO
2-metilbutirato de etilo	NS	NULO
isobutirato de etilo	NS	NULO
butirato de etilo	NS	NULO
acetato de etilo	NS	NULO
acetaldehído	NS	NULO
diacetilo	NS	NULO
β -feniletanol	0.05	Inapreciable
ácido butírico	0.05	Inapreciable
alcohol isoamílico	0.05	Inapreciable
octanoato de etilo	0.05	Inapreciable
metionol	0.05	Inapreciable
ácido octanoico	0.05	Inapreciable
ácido hexanoico	0.05	Inapreciable
hexanoato de etilo	0.05	Inapreciable
ácido isovalerico	0.05	Inapreciable
acetato de isoamilo	0.05	Algo menos frutal
β -damascenona	0.05	Menos intenso

Tabla 1.— Efecto de la omisión en la mezcla de compuestos mayoritarios del aroma del vino (el buffer o tampón aromático) de uno de los compuestos consituyentes (adaptada de (Ferreira, et al. 2002))

El efecto que sobre el aroma de la mezcla tuvo la adición a la misma de distintos compuestos aromáticos puede verse en la tabla 2 (Escudero, et al. 2004). Los resultados son de nuevo sorprendentes, ya que puede verse que la adición de cantidades muy altas (en términos de aroma) de algunos odorantes apenas pudo ser percibida. En algunos casos, las adiciones sí que fueron sensorialmente percibidas pero, curiosamente, el efecto sensorial no fue la identificación en la mezcla del olor de la sustancia añadida, sino una disminución de la intensidad de algunos de los atributos básicos de la mezcla. La excepción a este comportamiento de nuevo fue el acetato de isoamilo.

La existencia de este buffer aromático constituye un reto científico para la neurofisiología y, desde el punto de vista práctico, tiene un efecto tan determinante sobre la forma

Compuesto añadido (cantidad e incremento relativo)	Efecto	Observaciones
ácido hexanoico (6.2 ppm; 2.5x)	Ligero	- frutal; - caramelo
β -feniletanol (300 ppm; 21x)	NULO	
acetato de isoamilo (5.5 ppm; 2.2x)	Ligero	+ plátano
octanoato de etilo (6.0 ppm; 8.6x)	NULO	
2,6-dimetoxifenol (2 ppm; 4000x)	Ligero	- floral; - caramelo
guaiacol (15 ppb; 71x)	Ligero	- piña; - caramelo; - floral
Furaneol (800 ppb; 27x)	NULO	
Sotolon (140 ppb; 28x)	Claro	- frutal; - caramelo
β -damascenona (4.5 ppb; 1x)	NULO	

Tabla 2.— Efectos sensoriales causados por la adición de algunos compuestos aromáticos a la mezcla de compuestos volátiles mayoritarios del vino (adaptada de (Escudero, et al. 2004))

en la que se establecen las relaciones jerárquicas entre los odorantes del vino, que puede ser empleado como base para elaborar un sistema de clasificación de dichos odorantes.

3 ¿Cómo se puede romper el buffer aromático?

Afortunadamente, el aroma de muchos vinos es muy rico en notas aromáticas claramente diferentes al aroma “vinoso” de la mezcla de compuestos de fermentación. Esto indica que algunas moléculas aromáticas han sido capaces de romper el buffer aromático y transmitir o inducir la aparición de una nota sensorial diferente. Aunque en este momento estamos lejos de comprender por qué algunas moléculas pueden romper el buffer aromático y otras no, la observación sistemática ha permitido identificar cuatro maneras distintas de romper este buffer:

1. Una molécula única a concentración suficiente, tal y como ocurre, por ejemplo, con el linalol en los vinos de Moscatel
2. Un grupo de moléculas con características químicas y aromáticas similares, tal y como puede ser el grupo de las γ -lactonas alifáticas de entre 8 y 12 átomos de carbono
3. Un gran grupo de moléculas con alguna similitud en uno de sus descriptores aromáticos genéricos (no específicos), como por ejemplo “dulce”, tal y como ocurre en la asociación entre linalol, etil cinamato e hidrocinnamato y γ -lactonas

- Mediante la asociación de un potenciador aromático y una o varias moléculas aromáticas incapaces de romper el buffer por sí mismas. En este caso se observa a menudo la creación de una nueva nota aromática

El hecho de que se rompa el buffer implica que será posible percibir una nueva nota aromática en la mezcla. Dejando de lado la cuarta posibilidad de la lista anterior, tal nota aromática estará relacionada de manera directa con el aroma o grupo de aromas que han roto el buffer. La percepción, sin embargo, puede variar desde la clara detección e identificación del aroma específico de la molécula odorante, hasta tan sólo uno de los descriptores genéricos de dicha molécula. Por ejemplo, en algunos vinos Moscatel el linalol puede ser claramente percibido; en estos vinos el linalol está transmitiendo al vino sus notas aromáticas específicas. Sin embargo, en muchos otros vinos el linalol tan sólo añade al vino una nota floral inespecífica. En estos casos es un descriptor genérico del linalol el que es transmitido. Estas ideas pueden comprenderse de una manera más sencilla con ayuda de las figuras 3 y 4.

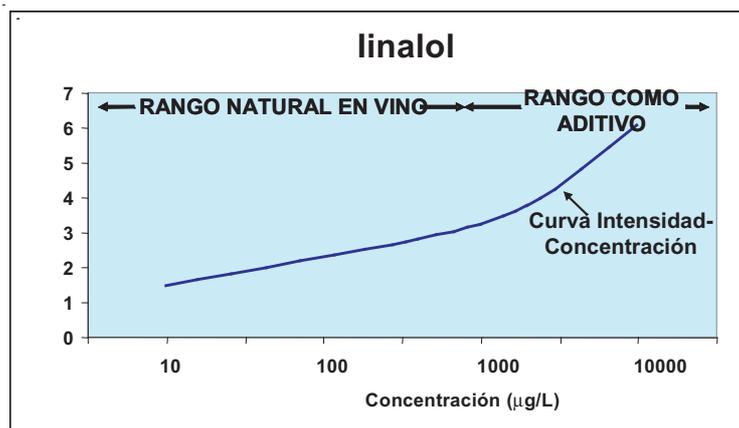


Figura 3.— Relación entre la concentración de linalol y su papel potencial en el aroma del vino.

La figura 3 esquematiza la capacidad del linalol para transmitir sus notas aromáticas al vino en función de su concentración. Como puede verse, por debajo de las 10 ppb el linalol no puede ser detectado en la mezcla aromática, aunque todavía podría contribuir a una nota dulce genérica mediante la asociación con muchos otros aromas que también tuvieran carácter dulce. Entre 10 y 20 ppb puede ser percibido pero sólo si es reforzado por la presencia de algunos otros componentes que tengan alguna similitud en aroma, como es el cinamato de etilo. En este caso, su contribución al aroma del vino es genérica y se limita a una nota dulce-floral inespecífica. Entre 20 y 50 ppb ya tiene potencia suficiente para ser percibido independientemente de la presencia de otros compuestos. Sin embargo, a estas concentraciones sigue comunicando al vino una nota floral-dulce, que es uno de sus descriptores genéricos. Entre 50 y 120 ppb ya es capaz de comunicar al vino una

nota floral clara. Por encima de esta concentración la nota aromática ya comienza a ser identificada como Moscatel, y por tanto es a partir de esta concentración cuando puede decirse que el linalol se comporta como un compuesto impacto genuino ya que transmite al vino sus notas aromáticas más específicas. Tal y como puede verse en la figura, y esto es una constante de todos los componentes aromáticos del vino, incluso la máxima concentración a la que se puede encontrar este componente en el vino es inferior al rango de concentraciones en que este compuesto es empleado por la industria alimentaria.

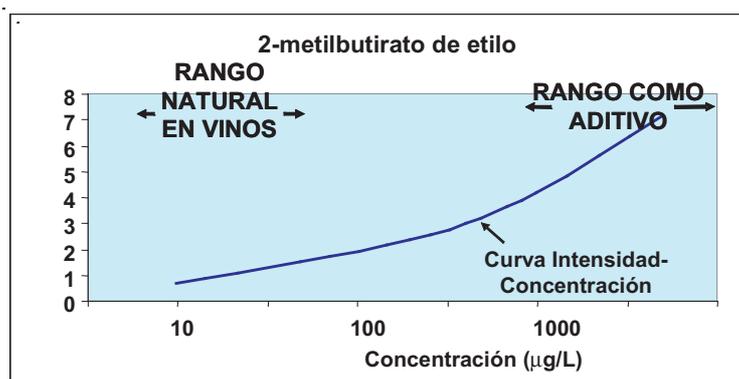


Figura 4.— Relación entre la concentración de 2-metilbutirato de etilo y su papel potencial en el aroma del vino.

El segundo ejemplo es el del 2-metilbutirato de etilo. Tal y como muestra la gráfica, este compuesto nunca alcanza en el vino el nivel al que se emplea como aditivo por la industria. Sin embargo, el vino contiene muchos otros componentes con una alta similitud química y aromática, tal y como son el isobutirato de etilo, el isovalerato de etilo y algunos otros ésteres ramificados o cíclicos recientemente identificados (Campo, et al. 2007). Este compuesto nunca, por tanto, transmitirá al vino sus descriptores aromáticos específicos. Sin embargo, en asociación con sus congéneres y con otros componentes de características frutales podrá ser un contribuyente neto a las notas frutales de algunos vinos.

Con todas estas ideas es posible proponer una clasificación de los compuestos del aroma del vino.

4 Clasificación de los compuestos del aroma del vino

Los compuestos aromáticos del vino pueden ser clasificados atendiendo al papel aromático más relevante que pueden jugar en el vino. Cada compuesto se asignará a la clase correspondiente al papel aromático más importante que dicho componente puede jugar en toda la gama de vinos. De acuerdo con este criterio podemos establecer las siguientes categorías:

1. Compuestos impacto o altamente activos. Son los componentes que pueden transmitir de manera efectiva sus características específicas (caso de los impacto) o sus

características primarias (altamente activos) sin la necesidad del soporte de más componentes químicos. Por ejemplo, linalol.

2. Familias de compuestos impacto. Se trata de familias de compuestos con similitud tanto en sus estructuras químicas como en sus características sensoriales. Varios de estos grupos están formados por series de compuestos homólogos, como es el caso de la γ -lactonas.
3. Compuestos o familias de papel sutil o secundario. Se trata de aquellos componentes o grupos de componentes que no son capaces de transmitir sus notas aromáticas específicas al vino pero que contribuyen de manera neta a alguna nota aromática secundaria o genérica (como por ejemplo frutal, dulce). La nota aromática será el resultado de la interacción de estos componentes con otros compartiendo alguna similitud aromática. Los compuestos clasificados en las categorías 1 y 2, cuando no alcanzan suficiente concentración, o si incluso alcanzándola, concurren con muchos otros aromas potentes (tal y como ocurre en vinos complejos), pueden pertenecer a esta categoría.
4. Compuestos formando la base del aroma. Estos son los componentes genéricos de fermentación presentes en todos los vinos en concentraciones superiores al valor umbral e integrando el buffer aromático. El aroma de todos estos componentes está totalmente integrado, de manera que no es posible identificar las notas de los componentes individuales. Dentro de este grupo hay algunos compuestos que pueden actuar como potenciadores del aroma y otros que lo hacen como depreciadores.
5. “Off-flavours”. Son los componentes cuya presencia lleva asociada una disminución en la calidad general del vino.

4.1 *Compuestos impacto*

De acuerdo con nuestra experiencia y con los datos publicados en la literatura científica, los siguientes componentes pueden actuar como componentes impacto de algún tipo de vino:

1. Linalol. El primer componente aromático que se demostró que efectivamente contribuía de forma neta y positiva al aroma de algunos vinos Moscatel fue el linalol (Cordonnier and Bayonove 1974, Ribéreau-Gayon, et al. 1975). Su contribución al aroma característico de varias variedades gallegas ha sido claramente demostrada (Versini, et al. 1994, Campo, et al. 2005, Vilanova and Sieiro 2006) así como a las notas florales o incluso cítricas de otras variedades blancas (Arrhenius, et al. 1996, Lee and Noble 2003, Campo, et al. 2005, Palomo, et al. 2006).

2. Óxido de rosa cis. Este otro terpeno de agradable olor floral fue identificado como componente característico del aroma de los vinos elaborados con la variedad Gewrztraminer (Guth 1997). Posteriormente se ha demostrado su papel en el perfil sensorial de los vinos eslovacos hechos con la variedad Devin (Petka, et al. 2006), y la presencia de este componente en hidrolizados de precursores obtenidos a partir de diversas variedades neutras de uva (Ibarz, et al. 2006).
3. (E)-whiskylactona. Es un compuesto impacto de los vinos envejecidos en madera (Boidron, et al. 1988). Por encima de cierta concentración puede producir un olor excesivo y desagradable a madera (Pollnitz, et al. 2000).
4. Sotolon (3-hidroxi-4,5-dimetil-2(5H)-furanona) es también un compuesto impacto de vinos hechos con uvas botritizadas (Masuda, et al. 1984), o sometidos a crianza biológica (Martin, et al. 1990, Martin, et al. 1992, Moreno, et al. 2005), de vinos dulces naturales (Cutzach, et al. 1998, Cutzach, et al. 1999), vino de Oporto (Ferreira, et al. 2003) o vino de Madeira (Camara, et al. 2004). Su nivel, en general, aumenta con la oxidación (Escudero, et al. 2000).
5. 4-metil-4-mercaptopentanona. Tiene un olor característico de boj que puede ser percibido en algunos vinos hechos con Sauvignon Blanc (Darriet, et al. 1991, Darriet, et al. 1993, Darriet, et al. 1995) or Scheurebe (Guth 1997).
6. 3-mercapto-hexanol. Tiene un olor que recuerda a mango verde o a boj. Se identificó en primer lugar en vinos de Cabernet-Sauvignon y Merlot (Bouchilloux, et al. 1998) pero posteriormente se encontró en muchos otros (Tominaga, et al. 2000). Es un compuesto impacto de algunos vinos rosados (Murat, et al. 2001, Ferreira, et al. 2002) y de vinos blancos elaborados con la variedad Petit Arvine (Fretz, et al. 2005).
7. Acetato de 3-mercaptohexilo. Se encontró primero en vinos de Sauvignon Blanc (Tominaga, et al. 1996), pero se puede encontrar también en muchos otros tipos de vino (Tominaga, et al. 2000, Lopez, et al. 2003, Cullere, et al. 2004, Gomez-Miguez, et al. 2007). Se ha demostrado recientemente que es el aroma impacto de los vinos elaborados con uvas de la variedad Verdejo, a los que confiere su aroma a fruta tropical característico (Campo, et al. 2005).
8. Furfuriltiol (FFT, o 2-furanmetanetiol). Este componente de fuerte aroma a café se forma en la reacción entre el furfural procedente de la barrica y el ácido sulfídrico formado durante la fermentación (Blanchard, et al. 2001). Algunos vinos madurados en barrica, tanto blancos como tintos, desarrollan aromas que muy probablemente son debidos a este componente, si bien no hay muchos datos analíticos fiables que soporten esta información. Se ha encontrado en cantidades relativamente elevadas

en vinos envejecidos de Champagne (Tominaga, et al. 2003) y de otros orígenes (Tominaga and Dubourdieu 2006).

9. Bencilmercaptano. Se trata de un componente con un potente aroma a tostado, y junto con el FFT puede impartir notas torrefactas y empireumáticas a algunos vinos envejecidos tales como los Champagnes envejecidos o los Chardonnays criados sobre lías (Tominaga, et al. 2003, Tominaga, et al. 2003).
10. Sulfuro de dimetilo (DMS). Este componente se identificó hace bastante tiempo en vinos envejecidos (Marais 1979) y aparentemente juega un papel ambiguo y controvertido en el aroma. A menudo su presencia se relaciona con un defecto (olor azufrado) (Park, et al. 1994, Ferreira, et al. 2003), pero algunos otros autores han demostrado que ejerce un poderoso efecto potenciador de la nota frutal de algunos vinos tintos de alta calidad (Segurel, et al. 2004, Escudero, et al. 2007).
11. Metional (metil-tiopropenal). El metional es también un componente de olor relativamente desagradable cuyo papel es ambiguo. Aunque en los vinos blancos jóvenes es la causa de olores desagradables (Escudero, et al. 2000), en vinos más complejos como vinos de Chardonnay fermentados en barrica o en grandes vinos tintos, contribuye a la complejidad de las notas aromáticas. En el caso de los vinos tintos, y junto con el furaneol y el sotolon, es un contribuyente a las notas a chocolate (Ferreira, et al. 2005)
12. El diacetilo es otro componente cuyo papel en el aroma del vino es complejo y controvertido. Fue una de las primeras moléculas aromáticas identificadas en el aroma del vino, (Fornacho.Jc and Lloyd 1965), y ha sido a menudo señalado como el causante de un defecto aromático cuando se encuentra a altas concentraciones (Clarke and Bakker 2004). Su efecto sensorial depende en gran medida del tipo de vino (Martineau, et al. 1995, Bartowsky, et al. 2002), su concentración varía con el tiempo y con el nivel de dióxido de azufre del vino (Nielsen and Richelieu 1999), es responsable de la apreciada nota a mantequilla que se puede observar en algunos vinos de Chardonnay (Martineau, et al. 1995, Bartowsky, et al. 2002), y también se ha sugerido que podría jugar algún papel en las notas dulces de algunos vinos de Oporto (Rogerson, et al. 2001). El carácter ambiguo de esta molécula aromática ha sido reconocido por varios autores (Lonvaud-Funel 1999, Bartowsky and Henschke 2004).
13. Acetato de isoamilo. Este es el único éster capaz de transmitir sus notas aromáticas características a algunos vinos, en ocasiones hasta alcanzar un nivel desagradable.

En vinos tintos elaborados con las variedades tempranillo o pinotage es un aroma característico (Van Wyk, et al. 1979, Ferreira, et al. 2000).

14. Rotundona. Se trata de un sesquiterpeno de muy interesantes propiedades sensoriales, ya que tiene olor especiado (a pimienta) y ejerce además un importante efecto quemostésico. Esto es, no sólo tiene olor, sino que tiene asociado un efecto entre picante y refrescante, similar al observado al oler pimienta (de hecho se trata del compuesto impacto de la pimienta). La identificación de esta molécula en algunos vinos de Shyraz australianos acaba de ser presentada por investigadores del Australian Wine Research Institute (Pollnitz, et al. 2007).

Tal y como se indicó anteriormente, todos los aromas de la lista anterior pueden ser percibidos de manera neta en ciertos vinos en los que, por lo general, alcanzan concentraciones relativamente altas (con respecto a su umbral). Cuando se encuentran en concentraciones inferiores, no actúan como componentes impacto, o incluso como componentes muy activos, sino como contribuyentes a una cierta nota aromática. En estos casos su aroma no puede ser netamente identificado en el vino, sino que es uno de sus caracteres aromáticos más genéricos, como su carácter frutal o dulce, el que puede ser percibido

4.2 Familias de aroma homogéneo

Un caso particular de efecto aditivo (o eventualmente sinérgico) es el que tiene lugar entre compuestos que comparten características químicas, aromáticas y, muy a menudo, también rutas de biosíntesis (Jarauta, et al. 2006). En estos casos podemos hablar de familias de odorantes impacto. El papel que juegan estas familias es menos conocido ya que su presencia no ha sido reconocida hasta muy recientemente, si bien este concepto está latente en las agrupaciones de aroma realizadas por algunos autores (Moreno, et al. 2005) y ha sido objeto de investigación en dos recientes tesis doctorales desarrolladas en nuestro laboratorio (Jarauta 2004, Culleré 2005). En este grupo se pueden identificar las siguientes familias:

1. Esteres etílicos de los ácidos grasos, responsables de las notas frutales de algunos vinos blancos (Ferreira, et al. 1995),
2. γ -lactonas alifáticas, que contribuyen al aroma a melocotón observado en algunos vinos tintos (Ferreira, et al. 2004, Jarauta 2004),
3. Fenoles volátiles como el guaiacol, eugenol, 2,6-dimetoxifenol, isoeugenol y alil-2,6-dimetoxifenol,
4. Vainillas (vainillina, vanillato de metilo, vanillato de etilo y acetovanillona)

5. Compuestos de aroma a azúcar quemado (furaneol, homofuraneol, maltol) (Jarauta 2004),
6. Acetatos de alcoholes de fusel
7. Aldehídos alifáticos con 8, 9 y 10 átomos de carbono,
8. Aldehídos ramificados, 2-metilpropanal, 2-metilbutanal y 3-metilbutanal (Culleré 2005, Cullere, et al. 2007),
9. Esteres etílicos de ácidos grasos ramificados o cíclicos, etil- 2,3 y 4-metilpentanoatos y etil ciclohexanoato (Campo, et al. 2006, Campo, et al. 2006), algunos de los cuales han sido identificados sólo recientemente. El aroma de estos componentes podría actuar de manera aditiva con los de los otros ésteres etílicos de ácidos grasos ramificados del vino (etil isobutirato, etil isovalerato y etil 3-metilbutirato).

4.3 “Off flavours”

Lo primero que es preciso reconocer es que el concepto de off-flavour es relativo y a veces un tanto resbaladizo. Esto es así porque dicho concepto está en muchas ocasiones íntimamente relacionado con la experiencia y las expectativas personales del evaluador o consumidor. Por ejemplo, muchos productores locales y consumidores tradicionales del vino clásico de Rioja, se acostumbraron a la presencia de cantidades no muy altas pero notables de etil-fenoles (4-etilfenol y 4-etilguaiacol), de manera que para ellos la nota fenólica producida por estos componentes era algo esencial en sus vinos, cuando en muchas otras zonas y tipos de vino dicha nota es considerada un defecto. Exactamente el mismo caso puede describirse entre los productores y consumidores del vino Beaujolais. De manera similar, algunos productores de vinos elaborados con la variedad Sauvignon Blanc se muestran orgullosos de las notas terrosas y a pimienta que niveles altos de metoxipirazinas generan en sus vinos, cuando estas notas son consideradas defectos en otras regiones. Esta diversidad de valoraciones no se observa, por lo general, en el caso de los defectos producidos por moléculas exógenas, como ocurre en el caso del tricloroanisol (TCA).

Nuestra opinión personal (y por tanto refutable) acerca del tipo de moléculas que deben ser consideradas como defectos es que todas aquellas moléculas que, de ser eliminadas del vino, provocarían una mejora en sus características sensoriales, deberían ser consideradas como defectos potenciales. Lo cierto es que si los etilfenoles se eliminaran de muchos vinos tintos, su aroma se haría más intenso y frutal, y si las metoxipirazinas se eliminaran de algunos vinos blancos, su aroma se haría más floral y frutal (Campo, et al. 2005).

También es conveniente señalar que algunas moléculas de olor aparentemente negativo pueden jugar en ocasiones un importante papel en el aroma del vino. Por ejemplo, el

sulfuro de dimetilo (DMS) es un potente potenciador del carácter frutal de algunos vinos tintos (Segurel, et al. 2004, Escudero, et al. 2007). Otro ejemplo es el del metional que en vinos blancos jóvenes puede causar una clara merma de su calidad, pero en algunos vinos tintos puede jugar un interesante papel en la percepción notas complejas a chocolate (Ferreira, et al. 2005).

La tercera cuestión que debe remarcarse es que, en general, el efecto negativo de muchas de las moléculas consideradas como defectos es apreciable a concentraciones bastante inferiores a las que su aroma empieza a ser claramente identificado. Antes de alcanzar ese nivel de reconocimiento, el olor de la molécula no puede ser identificado pero sí que es posible detectar una disminución de alguna de las notas sensoriales positivas del vino, y en ocasiones una pérdida del equilibrio aromático y/o gustativo del vino. Este fenómeno implica que puede haber moléculas que estén causando una relevante merma en la calidad de los vinos y que sin embargo no hayan sido identificadas, si en ningún vino han alcanzado una concentración suficiente como para ser identificadas.

Finalmente, algunos problemas aromáticos no se deben a un único componente, sino a una familia de compuestos actuando de manera sinérgica o aditiva, tal y como se describió en el caso de los aromas positivos. La acción conjunta de una serie de compuestos producidos en la fermentación (ácidos grasos ramificados, acetoina, vinilfenoles, etilfenoles y algunos alcoholes) se ha descrito recientemente (Campo, Tesis Doctoral, Zaragoza 2006) y podría ser una de las causas más importantes de la baja calidad de algunos vinos comerciales españoles. La existencia de dicha acción concertada hace que el efecto negativo sobre la calidad del vino tenga lugar a concentraciones muy inferiores a las que estos componentes son habitualmente considerados un defecto, lo que ciertamente pone en cuestión algunos de los límites de seguridad previamente establecidos.

La siguiente lista resume los compuestos que, de acuerdo con la literatura científica, pueden ser causantes de problemas aromáticos:

1. Compuestos producidos por micro-organismos a partir de precursores presentes en el mosto. Algunas moléculas cuyo olor no es excesivamente agradable han sido señaladas como causantes de problemas aromáticos en los vinos, en ocasiones sin la existencia de datos contrastados. Sin poder asignar claramente el origen de dichas observaciones, moléculas como las aminas biógenas, los alcoholes de fusel, el c-3-hexenol o el metionol son a menudo citadas como compuestos negativos (Swiegers, et al. 2005). Por otra parte, el papel negativo jugado por algunas otras moléculas, como son el ácido acético, la acetoína, los compuestos azufrados volátiles, es bien conocido y no será considerado en esta discusión. Dejando de lado estos componentes, se han descrito los siguientes:

- (a) Compuestos responsables del olor a moho o humedad. Se han identificado

cuatro compuestos diferentes: 2-acetiltetrahidropiridina y 2-etiltetrahidropiridina (Strauss and Heresztyn 1984), 2-acetilpirrolina (Herderich, et al. 1995) y, más recientemente, 2-metoxi-3,5-dimetilpirazina (Simpson, et al. 2004), tal y como se ha señalado en una reciente revisión (Snowdon, et al. 2006). Estos compuestos tienen un olor desagradable que a menudo ha sido (y todavía es) erróneamente asignado a la acetamida. Es interesante hacer notar que estos compuestos son lo suficientemente poco volátiles en la matriz vino como para que sean más fácilmente percibidos por vía retronasal. Por vía ortonasal sólo algunas personas son sensibles a su olor, cuando la mayor parte de los catadores pueden percibirlos fácilmente en la boca bajo forma de un postgusto largo y desagradable.

(b) Notas a caballo-cuero. Este problema aromático se debe básicamente al 4-etilfenol y 4-etilguaicol formados por levaduras del género *Brettanomyces/Dekkera* (Chatonnet, et al. 1992, Chatonnet, et al. 1997, Dias, et al. 2003). Ciertamente este problema es uno de los más evidentes de muchos vinos tintos españoles.

(c) Nota fenólica-farmacéutica. Algunas levaduras y bacterias tienen la capacidad de hidrolizar primero y, descarboxilar después, los ácidos cinámicos del vino para formar 4-vinilfenol y 4-vinilguaicol en cantidades lo suficientemente altas como para que se detecte en los vinos una nota a fenol-farmacía (Chatonnet, et al. 1993, Dugelay, et al. 1993).

2. Compuestos formados por oxidación. Hay varias moléculas de potente aroma que se forman durante la oxidación del vino blanco. Estos compuestos son el acetaldehído, el metional y el fenilacetaldehído (Escudero, et al. 2000, Escudero, et al. 2000, Aznar, et al. 2003, Ferreira, et al. 2003, Ferreira, et al. 2003). Este último componente tiene una gran responsabilidad en la deterioración oxidativa de los vinos tintos (Aznar, et al. 2003). Otros componentes que también se han encontrado relacionados con problemas sensoriales ligados a la oxidación son los E-2-alkenales (E-2-hexenal, E-2-octenal y E-2-nonenal), relacionados con olores a papel, tiza o polvo (Culleré 2005, Cullere, et al. 2007).

3. Problemas de olor relacionados con el corcho y la madera. El compuesto químico con mayor responsabilidad en el problema aromático asociado al corcho es el 2,4,6-tricloroanisol (TCA) (Buser, et al. 1982). Algunas otras moléculas podrían estar también implicadas en dicho problema, ya que distintos autores han sugerido que moléculas como guaicol (Pena-Neira, et al. 2000, Alvarez-Rodriguez, et al. 2003), 2,4,6-tribromoanisol (TBA) (Chatonnet, et al. 2004) o 2-metoxi-3,5-dimetilpirazina

(Simpson, et al. 2004) podrían ser también causantes de problema. El TCA, sin embargo, parece ser el más importante a causa tanto de su distribución como de su bajo umbral de detección (Prescott, et al. 2005). Otro compuesto causante de problemas, esta vez procedentes de la madera verde, es el E-2-nonenal, que puede causar un olor a tabla o serrín en el vino (Chatonnet and Dubourdieu 1998).

4. Problemas de olor relacionados con el envejecimiento. El primer compuesto identificado en esta categoría fue el TDN (1,1,6-trimetil-1,2-dihidronaftaleno). Este compuesto se produce por degradación lenta de los carotenoides en medio ácido (Strauss, et al. 1987, Winterhalter 1991) y presenta un olor a keroseno que puede ser percibido en vinos envejecidos de la variedad Riesling (Simpson 1978). Recientemente se ha descrito un componente similar en cuanto a naturaleza y efectos sensoriales denominado TPB E-1-(2,3,6-trimetilfenil) buta-1,3-dieno- (Cox, et al. 2005). En vinos alemanes es otro componente el causante problemas en el envejecimiento de los vinos blancos. Se trata de la 2-aminoacetofenona que le comunica al vino una nota artificial conocida como “envejecimiento atípico” (Rapp, et al. 1993). En este caso el compuesto procede de la degradación del ácido indol-acético (Hoenicke, et al. 2002).
5. Compuestos endógenos. Las alquil-2-metoxipirazinas fueron identificadas primero en extractos de vinos Sauvignon (Bayonove, et al. 1975), en los que se ha demostrado que juegan un importante papel en la nota vegetal, particularmente en la nota a pimiento verde (Allen, et al. 1991, Lacey, et al. 1991, Noble, et al. 1995, Deboubee, et al. 2000). Estos compuestos imparten al vino una nota terrosa que causa una depreciación del carácter frutal y a menudo de la calidad. La isopropyl-2-methoxypyrazina puede proceder también de un escarabajo (Pickering, et al. 2004, Pickering, et al. 2006).

Todas las listas anteriores nos proporcionan una panorámica relativamente completa acerca de los compuestos individuales que conforman el aroma y el sabor de los distintos vinos. La cuestión acerca de cómo interaccionan entre sí y con otros componentes para formar las distintas notas aromáticas de los vinos no está totalmente resuelta y en el epígrafe subsiguiente se mostrarán algunos de los avances más recientes

5 Algunos ejemplos acerca de la formación del aroma del vino

Una de las ideas claves de nuestro trabajo acerca del aroma del vino es de qué forma se rompe el buffer aromático producido por el alcohol y los otros compuestos mayoritarios de fermentación. La forma en la que esto ocurre (mediante más o menos compuestos impacto, o mediante la acción conjunta de un gran número de compuestos de importancia

secundaria) es la que determina la complejidad y las características aromáticas de los vinos.

5.1 Vinos cuya percepción aromática depende fundamentalmente de la presencia de un único compuesto químico

En general estos vinos son simples y tienen un aroma claro, sencillo y distinto causado por un único componente impacto. El grado de complejidad aromática dependerá tanto del nivel de concentración de dicha molécula, como de la presencia de otros compuestos aromáticos que pueden modificar o añadir nuevas notas aromáticas.

El ejemplo más característico de este tipo de vinos es el vino de Moscatel. Algunos otros ejemplos son vinos rosados de Garnacha, Merlot o Cabernet-Sauvignon, cuyas características aromáticas se deben a la presencia de altos niveles de 3-mercaptohexanol (Murat, et al. 2001, Ferreira, et al. 2002); los vinos de Sauvignon Blanc, cuyas características aromáticas se deben fundamentalmente a la presencia de la 4-methyl-4-mercapto pentan-2-one (Darriet, et al. 1995) o los vinos de Verdejo, que deben su característica nota a fruta exótica al acetato de 3-mercaptohexilo (Campo, et al. 2005). Un ejemplo particular de este tipo de vinos son algunos vinos tintos elaborados con Cabernet Sauvignon o Cabernet Franc en Nueva Zelanda o en algunas áreas de Francia, y que desarrollan un aroma a cassis muy intenso, debido casi por completo a la presencia de niveles altos de acetato de 3-mercaptohexilo.

En estos últimos casos, si los vinos contienen además de los componentes impacto anteriores, niveles relativamente altos de los ésteres etílicos de los ácidos grasos, de linalol o de acetato de isoamilo, la percepción final será más compleja, y probablemente, más apreciada por los consumidores.

Otro caso de vino simple y hoy no muy apreciado es el de aquellos vinos blancos de explícito olor a plátano consecuencia de niveles muy altos de acetato de isoamilo. Finalmente, el aroma frutal de algunos vinos blancos de aroma frutal simple se debe casi enteramente a la presencia de niveles altos de ésteres etílicos de ácidos grasos (Ferreira, et al. 1995).

5.2 Vinos sin compuestos impacto

En esta categoría encontramos vinos de aroma interesante y complejo que no puede ser atribuido a ningún compuesto químico (o familia) en particular. Es el caso, por ejemplo, de vinos blancos jóvenes hechos con Macabeo o Chardonnay, en los que sus notas aromáticas son debidas a la presencia simultánea de muchas familias de aromas relevantes presentes a concentraciones bastante modestas. Por ejemplo, se ha demostrado que las notas florales relacionadas con los precursores glicosídicos de estas variedades se deben a la presencia

simultánea de pequeñas cantidades de linalol, γ -lactonas, vainillinas, cinamatos y norisoprenoides (Loscos, et al. 2007). Sus notas frutales son el resultado de una interacción compleja entre esos componentes y los ésteres etílicos de los ácidos grasos, los acetatos de los alcoholes de fusel y pequeñas cantidades de algunos de los mercaptanos relacionados con la cisteína, como la 4-metil-4-mercaptopentanona o el acetato de 3-mercaptohexilo, e incluso también con algunos aldehídos alifáticos (Escudero, et al. 2004, Loscos, et al. 2007). En estos casos, obviamente, los vectores de calidad del vino son complejos y multivariantes.

5.3 Vinos complejos conteniendo varios compuestos potencialmente impacto

Ejemplos característicos de vinos de esta categoría son algunos vinos Chardonnay fermentados en barrica o envejecidos sobre sus propias lías. En este caso, los niveles de algunos compuestos fermentativos son inferiores y aparecen varios aromas muy potentes, como son las whiskylactonas, el diacetilo, metional y furfuriltiol. El aroma es complejo, ya que sobre la nota frutal básica se perciben las notas a madera proporcionadas por la whiskylactona, junto con la nota a mantequilla-nata característica del diacetilo y eventualmente notas más sutiles a coliflor y a café tostado, dadas por el metional y el furfuriltiol, respectivamente.

Otros ejemplos de estos vinos son los Jerez y los vinos de Sauternes. En el Jerez, el acetaldehído y varios aldehídos ramificados (isobutiraldehído, isovaleraldehído y 2-metilbutilaldehído) actúan como componentes impacto (Cullere, et al. 2007), pero también se encuentran cantidades altas de sotolon, lo que les confiere su nota a nuez característica. En el caso de los vinos de Sauternes, hay una gran variabilidad entre productores, pero en los vinos encontramos cantidades muy altas de compuestos muy activos aromáticamente, como son la 4-metil-4-mercaptopentanona, el 3-mercaptohexanol, el fenilacetaldehído y el sotolon (Campo et al., en preparación).

5.4 Vinos más complejos. El caso de los grandes vinos tintos

Los vinos tintos son, por naturaleza, mucho más complejos ya que entre otros muchos factores, contienen cantidades grandes de fenoles volátiles que ejercen un importante efecto de depresión de las notas frutales (Atanasova, et al. 2004). Este fenómeno todavía es más intenso en el caso de que los vinos hayan sido envejecidos en barricas de roble, lo que aumenta el nivel de fenoles volátiles y añade whiskylactonas a la mezcla. En este contexto químico, la percepción de las distintas notas, particularmente de las frutales, es muy compleja. Además, los grandes vinos tintos no muestran olores muy explícitos y específicos, sino que más bien muestran una amplia paleta de muchos olores de carácter más sutil. No es sorprendente, por tanto, que en los vinos tintos, dejando de lado la

whiskylactona, no se encuentren genuinos compuestos impacto, sino más bien grupos relativamente grandes de compuestos que contribuyen a las distintas notas aromáticas. En el caso de las notas frutales de estos vinos, y hasta la fecha, se han identificado varios componentes o grupos de componentes implicados en la percepción de la nota frutal de los vinos tintos:

1. La acción concertada de los ésteres etílicos, incluyendo aquí los ésteres etílicos ramificados recientemente descubiertos, junto con los nor-isoprenoides β -damascenona y β -ionona, y junto también con el efecto potenciador del DMS, es la responsables de la nota a fruta de baya (Escudero, et al. 2007).
2. La acción concertada de cinco γ -lactonas ((γ -octa, nona, deca, undeca y dodecalactonas) que puede ser responsable de las notas a melocotón de algunos vinos tintos españoles y portugueses (Jarauta, et al. 2006).
3. La acción concertada del furaneol, homofuraneol, maltol, sotolon, nor-isoprenoides y metional, que puede ser responsable de las notas a guinda y chocolate de algunos vinos tintos (Ferreira, et al. 2005).

6 Conclusión

La complejidad del aroma del vino está en consonancia con su complejidad química. Tal y como ocurre en los perfumes más complejos, y en contraste con la mayor parte de los productos aromatizados artificialmente, el aroma del vino es el resultado de interacciones complejas entre muchos componentes químicos con olor. Sólo en algunos casos particulares y sencillos es posible encontrar genuinos compuestos impacto capaces de transmitir al producto sus características aromáticas más específicas. En los productos más complejos y de mayor calidad, las notas sensoriales aparecen como consecuencia de la acción concertada de muchas moléculas y, de manera sorprendente, en muchos casos estas moléculas se encuentran en concentraciones muy cercanas a su valor umbral. Los resultados mostrados en este trabajo, todavía preliminares en algunos aspectos, muestran sin embargo, que se dispone de la tecnología analítica y de las herramientas conceptuales necesarias para desentrañar y comprender las distintas notas aromáticas y gustativas de los productos más apreciados y por tanto para definir sus vectores de calidad.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la MYCYT (proyectos AGL2004 06060/ALI y AGL2007 65139/ALI) y es el resultado de años de trabajo realizados por el Laboratorio de Análisis del Aroma y Enología de la Universidad de Zaragoza. Estoy particularmente

agradacido a los profesores Cacho, Escudero, Hernández-Orte, López, Culleré y de la doctora Campo.

Referencias

- [1] Alvarez-Rodriguez, M.L., Belloch, C., Villa, M., Uruburu, F., Larriba, G., and Coque, J.J.R. (2003). Degradation of vanillic acid and production of guaiacol by microorganisms isolated from cork samples. *Fems Microbiol. Letters* 220: 49-55.
- [2] Allen, M.S., Lacey, M.J., and Boyd, S. (1994). Determination of methoxypyrazines in red wines by stable isotope dilution gas chromatography-mass spectrometry. *J. Agric. Food Chem.* 42: 1734-1738.
- [3] Allen, M.S., Lacey, M.J., Harris, R.L.N., and Brown, W.V. (1991). Contribution of methoxypyrazines to Sauvignon blanc wine aroma. *Am. J. Enol. Vitic.* 42: 109-112.
- [4] Arrhenius, S.P., McCloskey, L.P., and Sylvan, M. (1996). Chemical markers for aroma of *Vitis vinifera* var Chardonnay regional wines. *J. Agric. Food Chem.* 44: 1085-1090.
- [5] Atanasova, B., Thomas-Danguin, T., Langlois, D., Nicklaus, S., and Etievant, P. (2004). Perceptual interactions between fruity and woody notes of wine. *Flavour Fragrance J.* 19: 476-482.
- [6] Aznar, M., Lopez, R., Cacho, J., and Ferreira, V. (2003). Prediction of aged red wine aroma properties from aroma chemical composition. Partial least squares regression models. *J. Agric. Food Chem.* 51: 2700-2707.
- [7] Bartowsky, E.J., Francis, I.L., Bellon, J.R., and Henschke, P.A. (2002). Is buttery aroma perception in wines predictable from the diacetyl concentration? *Aust. J. Grape Wine Res.* 8: 180-185.
- [8] Bartowsky, E.J., and Henschke, P.A. (2004). The 'buttery' attribute of wine-diacetyl-desirability, spoilage and beyond. *Int. J. Food Microbiol.* 96: 235-252.
- [9] Bayonove, C., Codonnier, R., and Dubois, P. (1975). Etude d'une fraction caractéristique de l'arôme du raisin de la variété Cabernet-Sauvignon ; mise en évidence de la 2-méthoxy-3-isobutylpyrazine. *C. R. Acad. Sci. Paris (SerieD)* 281: 75-78.
- [10] Blanchard, L., Tominaga, T., and Dubourdiou, D. (2001). Formation of furfurylthiol exhibiting a strong coffee aroma during oak barrel fermentation from furfural released by toasted staves. *J. Agric. Food Chem.* 49: 4833-4835.
- [11] Boidron, J.N., Chatonnet, P., and Pons, M. (1988). Influence du bois sur certaines substances odorantes des vins. *Conn. Vigne Vin* 22: 275-294.

- [12] Bouchilloux, P., Darriet, P., Henry, R., Lavigne-Cruege, V., and Dubourdieu, D. (1998). Identification of volatile and powerful odorous thiols in Bordeaux red wine varieties. *J. Agric. Food Chem.* 46: 3095-3099.
- [13] Buser, H.R., Zanier, C., and Tanner, H. (1982). Identification of 2,4,6-Trichloroanisole as a Potent Compound Causing Cork Taint in Wine. *J. Agric. Food Chem.* 30: 359-362.
- [14] Camara, J.S., Marques, J.C., Alves, M.A., and Ferreira, A.C.S. (2004). 3-hydroxy-4,5-dimethyl-2(5H)-furanone levels in fortified Madeira wines: Relationship to sugar content. *J. Agric. Food Chem.* 52: 6765-6769.
- [15] Campo, E., Cacho, J., and Ferreira, V. (2006). Multidimensional chromatographic approach applied to the identification of novel aroma compounds in wine. Identification of ethyl cyclohexanoate, ethyl 2-hydroxy-3-methylbutyrate and ethyl 2-hydroxy-4-methylpentanoate. *J. Chromatogr. A* 1137: 223-230.
- [16] Campo, E., Cacho, J., and Ferreira, V. (2007). Solid phase extraction, multidimensional gas chromatography mass spectrometry determination of four novel aroma powerful ethyl esters - Assessment of their occurrence and importance in wine and other alcoholic beverages. *J. Chromatogr. A* 1140: 180-188.
- [17] Campo, E., Ferreira, V., Escudero, A., and Cacho, J. (2005). Prediction of the wine sensory properties related to grape variety from dynamic-headspace gas chromatography-olfactometry data. *J. Agric. Food Chem.* 53: 5682-5690.
- [18] Campo, E., Ferreira, V., Lopez, R., Escudero, A., and Cacho, J. (2006). Identification of three novel compounds in wine by means of a laboratory-constructed multidimensional gas chromatographic system. *J. Chromatogr. A* 1122: 202-208.
- [19] Clarke, R.J., and Bakker, J. (2004). *Wine flavour chemistry* (Oxford, UK: Blackwell Publishing).
- [20] Cordonnier, R., and Bayonove, C.L. (1974). Mise en evidence dans la baie de raisin, var. Muscat d'Alexandrie, de monoterpenes lies revelables par une ou plusieurs enzymes du fruit. *C.R. Acad. Sci. Paris (Serie D)* 278: 3387-3390.
- [21] Cox, A., Capone, D.L., Elsey, G.M., Perkins, M.V., and Sefton, M.A. (2005). Quantitative analysis, occurrence, and stability of (E)-1-(2,3,6-trimethylphenyl)buta-1,3-diene in wine. *J. Agric. Food Chem.* 53: 3584-3591.
- [22] Culleré, L. (2005). Contribución al estudio de los componentes carbonílicos del vino. Nuevos métodos de análisis y caracterización de su papel sensorial, PhD Thesis, Universidad de Zaragoza, Zaragoza.
- [23] Cullere, L., Cacho, J., and Ferreira, V. (2007). An assessment of the role played by some oxidation-related aldehydes in wine aroma. *J. Agric. Food Chem.* 55: 876-881.

- [24] Culleré, L., Cacho, J., and Ferreira, V. (2006). Validation of an analytical method for the solid phase extraction, in cartridge derivatization and subsequent gas chromatographic-ion trap tandem mass spectrometric determination of 1-octen-3-one in wines at ng L⁻¹ level. *Anal. Chim. Acta* 563: 51-57.
- [25] Cullere, L., Escudero, A., Cacho, J., and Ferreira, V. (2004). Gas chromatography-olfactometry and chemical quantitative study of the aroma of six premium quality Spanish aged red wines. *J. Agric. Food Chem.* 52: 1653-1660.
- [26] Cutzach, I., Chatonnet, P., and Dubourdieu, D. (1999). Study of the formation mechanisms of some volatile compounds during the aging of sweet fortified wines. *J. Agric. Food Chem.* 47: 2837-2846.
- [27] Cutzach, I., Chatonnet, P., Henry, R., Pons, M., and Dubourdieu, D. (1998). Etude sur l'arôme des vins doux naturels non muscatés. 2e partie: Dosages de certains composés volatils intervenant dans l'arôme des vins doux naturels au cours de leur élevage et de leur vieillissement. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 32: 211-221.
- [28] Chatonnet, P., Bonnet, S., Boutou, S., and Labadie, M.D. (2004). Identification and responsibility of 2,4,6-tribromoanisole in musty, corked odors in wine. *J. Agric. Food Chem.* 52: 1255-1262.
- [29] Chatonnet, P., and Dubourdieu, D. (1998). Identification of substances responsible for the 'sawdust' aroma in oak wood. *J. Sci. Food Agric.* 76: 179-188.
- [30] Chatonnet, P., Dubourdieu, D., Boidron, J.N., and Lavigne, V. (1993). Synthesis of Volatile Phenols by *Saccharomyces-Cerevisiae* in Wines. *J. Sci. Food Agric.* 62: 191-202.
- [31] Chatonnet, P., Dubourdieu, D., Boidron, J.N., and Pons, M. (1992). The origin of ethylphenols in wines. *J. Sci. Food Agric.* 60: 165-178.
- [32] Chatonnet, P., Viala, C., and Dubourdieu, D. (1997). Influence of polyphenolic components of red wines on the microbial synthesis of volatile phenols. *Am. J. Enol. Vitic.* 48: 443-448.
- [33] Darriet, P., Lavigne, V., Boidron, J., and Dubourdieu, D. (1991). Caractérisation de l'arôme varietal des vins de Sauvignon par couplage chromatographique en phase gazeuse-odometrie. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 25: 167-174.
- [34] Darriet, P., Tominaga, T., Demole, E., and Dubourdieu, D. (1993). Mise en évidence dans le raisin de *Vitis vinifera* var. Sauvignon d'un précurseur de la 4-mercapto-4-méthylpentan-2-one. *C.R. Acad. Sci. Paris (Serie D)* 316: 1332-1335.
- [35] Darriet, P., Tominaga, T., Lavigne, V., Boidron, J.N., and Dubourdieu, D. (1995). Identification of a powerful aromatic component of *Vitis vinifera* L. var. Sauvignon wines: 4-mercapto-4-méthylpentan-2-one. *Flavour Fragrance J.* 10: 385-392.

- [36] Deboubee, D.R., Van Leeuwen, C., and Dubourdieu, D. (2000). Organoleptic impact of 2-methoxy-3-isobutylpyrazine on red Bordeaux and Loire wines. Effect of environmental conditions on concentrations in grapes during ripening. *J. Agric. Food Chem.* 48: 4830-4834.
- [37] Dias, L., Dias, S., Sancho, T., Stender, H., Querol, A., Malfeito-Ferreira, M., and Loureiro, V. (2003). Identification of yeasts isolated from wine-related environments and capable of producing 4-ethylphenol. *Food Microbiology* 20: 567-574.
- [38] Dugelay, I., Gunata, Z., Sapis, J.C., Baumes, R., and Bayonove, C. (1993). Role of Cinnamoyl Esterase-Activities from Enzyme Preparations on the Formation of Volatile Phenols During Winemaking. *J. Agric. Food Chem.* 41: 2092-2096.
- [39] Escudero, A., Cacho, J., and Ferreira, V. (2000). Isolation and identification of odorants generated in wine during its oxidation: a gas chromatography-olfactometric study. *European Food Research and Technology* 211: 105-110.
- [40] Escudero, A., Campo, E., Fariña, L., Cacho, J., and Ferreira, V. (2007). Analytical characterization of the aroma of five premium red wines. Insights into the role of odor families and the concept of fruitiness of wines. *J. Agric. Food Chem.* 55: 4501-4510. Escudero, A., Gogorza, B., Melús, M.A., Ortín, N., Cacho, J., and
- [41] Ferreira, V. (2004). Characterization of the aroma of a wine from Maccabeo. Key role played by compounds with low odor activity value. *J. Agric. Food Chem.* 52: 3516-3524.
- [42] Escudero, A., Hernandez-Orte, P., Cacho, J., and Ferreira, V. (2000). Clues about the role of methional as character impact odorant of some oxidized wines. *J. Agric. Food Chem.* 48: 4268-4272.
- [43] Etievant, P.X. (1991). Wine. In *Volatile compounds in foods and beverages*, H. Maarse, ed. (New York, N.Y.: Marcel Dekker), pp. 483-546.
- [44] Ferreira, A.C.S., Barbe, J.C., and Bertrand, A. (2003). 3-hydroxy-4,5-dimethyl-2(5H)-furanone: A key odorant of the typical aroma of oxidative aged Port wine. *J. Agric. Food Chem.* 51: 4356-4363.
- [45] Ferreira, A.C.S., Hogg, T., and de Pinho, P.G. (2003). Identification of key odorants related to the typical aroma of oxidation-spoiled white wines. *J. Agric. Food Chem.* 51: 1377-1381.
- [46] Ferreira, A.C.S., Oliveira, C., Hogg, T., and de Pinho, P.G. (2003). Relationship between potentiometric measurements, sensorial analysis, and some substances responsible for aroma degradation of white wines. *J. Agric. Food Chem.* 51: 4668-4672.
- [47] Ferreira, A.C.S., Rodrigues, P., Hogg, T., and De Pinho, P.G. (2003). Influence of some technological parameters on the formation of dimethyl sulfide, 2-mercaptoethanol, methionol, and dimethyl sulfone in port wines. *J. Agric. Food Chem.* 51: 727-732.

- [48] Ferreira, V., Cullere, L., Loscos, N., and Cacho, J. (2006). Critical aspects of the determination of pentafluorobenzyl derivatives of aldehydes by gas chromatography with electron-capture or mass spectrometric detection - Validation of an optimized strategy for the determination of oxygen-related odor-active aldehydes in wine. *J. Chromatogr. A* 1122: 255-265.
- [49] Ferreira, V., Fernandez, P., Pena, C., Escudero, A., and Cacho, J.F. (1995). Investigation on the Role Played by Fermentation Esters in the Aroma of Young Spanish Wines by Multivariate-Analysis. *J. Sci. Food Agric.* 67: 381-392.
- [50] Ferreira, V., Jarauta, I., López, R., and Cacho, J. (2003). Quantitative determination of sotolon, maltol and free furaneol in wine by solid-phase extraction and gas chromatography-ion-trap mass spectrometry. *J. Chromatogr. A* 1010: 95-103.
- [51] Ferreira, V., Jarauta, I., Ortega, C., and Cacho, J. (2004). A simple strategy for the optimization of Solid-Phase-Extraction procedures through the use of solid-liquid distribution coefficients. Application to the determination of aliphatic lactones in wine. *J. Chromatogr. A* 1025: 147-156.
- [52] Ferreira, V., Lopez, R., and Cacho, J.F. (2000). Quantitative determination of the odorants of young red wines from different grape varieties. *J. Sci. Food Agric.* 80: 1659-1667.
- [53] Ferreira, V., Lopez, R., Escudero, A., and Cacho, J.F. (1998). The aroma of Grenache red wine: hierarchy and nature of its main odorants. *J. Sci. Food Agric.* 77: 259-267.
- [54] Ferreira, V., Ortín, N., Escudero, A., López, R., and Cacho, J. (2002). Chemical characterization of the aroma of grenache rosé wines. Aroma Extract Dilution Analysis, quantitative determination and sensory reconstitution studies. *J. Agric. Food Chem.* 50: 4048-4054.
- [55] Ferreira, V., Torres, M., Escudero, A., Ortín, N., and Cacho, J. (2005). Aroma composition and aromatic structure of red wines made with Merlot. In *State of the art in Flavour Chemistry and Biology, proceedings from the 7th Wartburg Symposium*, P.S.T. Hofman, ed. (Deutsche Forsch. Lebensm. Garching), pp. 292-299.
- [56] Fornacho, Jc, and Lloyd, B. (1965). Bacterial Production of Diacetyl and Acetoin in Wine. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 16: 710-& .
- [57] Fretz, C.B., Luisier, J.L., Tominaga, T., and Amado, R. (2005). 3-mercaptohexanol: An aroma impact compound of Petite Arvine wine. *Am. J. Enol. Vitic.* 56: 407-410.
- [58] Gomez-Miguez, M.J., Cacho, J.F., Ferreira, V., Vicario, I.M., and Heredia, F.J. (2007). Volatile components of Zalema white wines. *Food Chem.* 100: 1464-1473.
- [59] Guth, H. (1997). Identification of character impact odorants of different white wine varieties. *J. Agric. Food Chem.* 45: 3022-3026.

- [60] Guth, H. (1997). Quantitation and sensory studies of character impact odorants of different white wine varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 45: 3027-3032.
- [61] Herderich, M., Costello, P.J., Grbin, P.R., and Henschke, P.A. (1995). Occurrence of 2-Acetyl-1-Pyrroline in Mousy Wines. *Natural Product Letters* 7: 129-132.
- [62] Hoenicke, K., Borchert, O., Gruning, K., and Simat, T.J. (2002). "Untypical aging off-flavor" in wine: Synthesis of potential degradation compounds of indole-3-acetic acid and kynurenine and their evaluation as precursors of 2-aminoacetophenone. *J. Agric. Food Chem.* 50: 4303-4309.
- [63] Ibarz, M.J., Ferreira, V., Hernandez-Orte, P., Loscos, N., and Cacho, J. (2006). Optimization and evaluation of a procedure for the gas chromatographic-mass spectrometric analysis of the aromas generated by fast acid hydrolysis of flavor precursors extracted from grapes. *J. Chromatogr. A* 1116: 217-229.
- [64] Jarauta, I. (2004). Estudio analítico de fenómenos concurrentes en la generación del aroma durante la crianza del vino en barricas de roble con diferentes grados de uso. Nuevos métodos de análisis de importantes aromas y caracterización de su papel sensorial, University of Zaragoza, Zaragoza.
- [65] Jarauta, I., Ferreira, V., and Cacho, J. (2006). Synergic, additive and antagonistic effects between odorants with similar odour properties. In *Flavour Science: Recent advances and trends*, W.L.P. Bredie and M.A. Petersen, eds. (Amsterdam: Elsevier), pp. 2005-2208.
- [66] Kotseridis, Y., and Baumes, R. (2000). Identification of impact odorants in Bordeaux red grape juice, in the commercial yeast used for its fermentation, and in the produced wine. *J. Agric. Food Chem.* 48: 400-406.
- [67] Lacey, M.J., Allen, M.S., Harris, R.L.N., and Brown, W.V. (1991). Methoxypyrazines in Sauvignon blanc grapes and wines. *Am. J. Enol. Vitic.* 42: 103-108.
- [68] Lee, S.J., and Noble, A.C. (2003). Characterization of odor-active compounds in Californian Chardonnay wines using GC-olfactometry and GC-mass spectrometry. *J. Agric. Food Chem.* 51: 8036-8044.
- [69] Lonvaud-Funel, A. (1999). Lactic acid bacteria in the quality improvement and depreciation of wine. *Antonie Van Leeuwenhoek International Journal of General and Molecular Microbiology* 76: 317-331.
- [70] López, R., Ferreira, V., Hernández, P., and Cacho, J.F. (1999). Identification of impact odorants of young red wines made with Merlot, Cabernet Sauvignon and Grenache grape varieties: a comparative study. *J. Sci. Food Agric.* 79: 1461-1467.

- [71] Lopez, R., Ortin, N., Perez-Trujillo, J.P., Cacho, J., and Ferreira, V. (2003). Impact odorants of different young white wines from the Canary Islands. *J. Agric. Food Chem.* 51: 3419-3425.
- [72] Loscos, N., Hernandez-Orte, P., Cacho, J., and Ferreira, V. (2007). Release and formation of varietal aroma compounds during alcoholic fermentation from nonfloral grape odorless flavor precursors fractions. *J. Agric. Food Chem.* 55: 6674-6684.
- [73] Maarse, H., and Vischer, C.A. (1989). Volatile compounds in food. Alcoholic beverages. Qualitative and quantitative data (AJ Zeist, The Netherlands: TNO-CIVO, Food Analysis Institute).
- [74] Marais, J. (1979). Effect of Storage Time and Temperature on the Formation of Dimethyl Sulfide and on White Wine Quality. *Vitis* 18: 254-260.
- [75] Martin, B., Etievant, P., and Henry, R.N. (1990). The chemistry of sotolon: a key parameter for the study of a key component of Flor Sherry wines. In *Flavour Science and Technology*, Y. Bessire; and A.F. Thomas, eds. (Chichester (UK): Wiley), pp. 53-56.
- [76] Martin, B., Etievant, P.X., Quere, J., and Schlich, P. (1992). More clues about sensory impact of sotolon in some flor sherry wines. *J. Agric. Food Chem.* 40: 475-478.
- [77] Martineau, B., Acree, T.E., and Henickkling, T. (1995). Effect of Wine Type on the Detection Threshold for Diacetyl. *Food Research International* 28: 139-143.
- [78] Martineau, B., Henickkling, T., and Acree, T. (1995). Reassessment of the Influence of Malolactic Fermentation on the Concentration of Diacetyl in Wines. *Am. J. Enol. Vitic.* 46: 385-388.
- [79] Masuda, M., Okawa, E., Nishimura, K., and Yunome, H. (1984). Identification of 4,5-dimethyl-3-hydroxy-2(5H)-furanone (Sotolon) and ethyl 9-hydroxynonanoate in botrytised wine and evaluation of the roles of compounds characteristic of it. *Agricultural and Biological Chemistry* 48: 2707-2710.
- [80] Mateo-Vivaracho, L., Cacho, J., and Ferreira, V. (2007). Quantitative determination of wine polyfunctional mercaptans at nanogram per liter level by gas chromatography-negative ion mass spectrometric analysis of their pentafluorobenzyl derivatives. *J. Chromatogr. A* 1146: 242-250.
- [81] Moreno, J.A., Zea, L., Moyano, L., and Medina, M. (2005). Aroma compounds as markers of the changes in sherry wines subjected to biological ageing. *Food Control* 16: 333-338.
- [82] Murat, M., Tominaga, T., and Dubourdieu, D. (2001). Mise en évidence de composés clefs dans l'arôme des vins rosés et claires de Bordeaux. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 35: 99-105.

- [83] Nielsen, J.C., and Richelieu, M. (1999). Control of flavor development in wine during and after malolactic fermentation by *Oenococcus oeni*. *Appl. Environ. Microbiol.* 65: 740-745.
- [84] Noble, A.C., Elliottfisk, D.L., and Allen, M.S. (1995). Vegetative Flavor and Methoxy-pyrazines in Cabernet-Sauvignon. *ACS SYMPOSIUM SERIES* 596: 226-234.
- [85] Palomo, E.S., Perez-Coello, M.S., Diaz-Maroto, M.C., Vinas, M.A.G., and Cabezudo, M.D. (2006). Contribution of free and glycosidically-bound volatile compounds to the aroma of muscat "a petit grains" wines and effect of skin contact. *Food Chem.* 95: 279-289.
- [86] Park, S.K., Boulton, R.B., Bartra, E., and Noble, A.C. (1994). Incidence of Volatile Sulfur-Compounds in California Wines - a Preliminary Survey. *Am. J. Enol. Vitic.* 45: 341-344.
- [87] Pena-Neira, A., de Simon, B.F., Garcia-Vallejo, M.C., Hernandez, T., Cadahia, E., and Suarez, J.A. (2000). Presence of cork-taint responsible compounds in wines and their cork stoppers. *Eur. Food Res. Technol.* 211: 257-261.
- [88] Petka, J., Cacho, J., and Ferreira, V. (2003). Comparison of flavour perception routes in a synthetic wine model and with GC-Olfactometric data. In *Oenologie2003, 7th International Symposium of Oenology* (A. Lonvaud-Funel, ed.). pp. 563-565, Lavoisier (Paris): Bourdeaux.
- [89] Petka, J., Ferreira, V., Gonzalez-Vinas, M.A., and Cacho, J. (2006). Sensory and chemical characterization of the aroma of a white wine made with Devin grapes. *J. Agric. Food Chem.* 54: 909-915.
- [90] Pickering, G., Lin, J., Reynolds, A., Soleas, G., and Riesen, R. (2006). The evaluation of remedial treatments for wine affected by *Harmonia axyridis*. *International Journal of Food Science and Technology* 41: 77-86.
- [91] Pickering, G., Lin, J., Riesen, R., Reynolds, A., Brindle, I., and Soleas, G. (2004). Influence of *Harmonia axyridis* on the sensory properties of white and red wine. *Am. J. Enol. Vitic.* 55: 153-159.
- [92] Pollnitz, A.P., Capone, D.L., and Sefton, M.A. (2007). Spicy aroma in Shyraz. In *13th Australian Technical Wine Industry Conference: Adelaide (Australia)*.
- [93] Pollnitz, A.P., Pardon, K.H., and Sefton, M.A. (2000). 4-Ethylphenol, 4-ethylguaiacol and oak lactones in Australian red wines. *Aust. Grapegrower Winemaker* 438: 47-50.
- [94] Prescott, J., Norris, L., Kunst, M., and Kim, S. (2005). Estimating a "consumer rejection threshold" for cork taint in white wine. *Food Qual. Pref.* 16: 345-349.
- [95] Rapp, A., Versini, G., and Ullemeyer, H. (1993). 2-Aminoacetophenone - Causal Component of Untypical Aging Flavor (Naphthalene Note, Hybrid Note) of Wine. *Vitis* 32: 61-62.

- [96] Ribéreau-Gayon, P., Boidron, J.N., and Terrier, A. (1975). Aroma of muscat grape varieties. *J. Agric. Food Chem.* 23: 1042-1047.
- [97] Rogerson, F.S.S., Castro, H., Fortunato, N., Azevedo, Z., Macedo, A., and De Freitas, V.A.P. (2001). Chemicals with sweet aroma descriptors found in Portuguese wines from the Douro region: 2,6,6-Trimethylcyclohex-2-ene-1,4-dione and diacetyl. *J. Agric. Food Chem.* 49: 263-269.
- [98] Schneider, R., Kotseridis, Y., Ray, J.L., Augier, C., and Baumes, R. (2003). Quantitative determination of sulfur-containing wine odorants at sub parts per billion levels. 2. Development and application of a stable isotope dilution assay. *J. Agric. Food Chem.* 51: 3243-3248.
- [99] Segurel, M.A., Razungles, A.J., Riou, C., Salles, M., and Baumes, R.L. (2004). Contribution of dimethyl sulfide to the aroma of Syrah and Grenache Noir wines and estimation of its potential in grapes of these varieties. *J. Agric. Food Chem.* 52: 7084-7093.
- [100] Simpson, R.F. (1978). 1,1,6-Trimethyl-1,2-Dihydronaphthalene - Important Contributor to Bottle Aged Bouquet of Wine. *Chemistry & Industry*: 37-37.
- [101] Simpson, R.F., Capone, D.L., and Sefton, M.A. (2004). Isolation and identification of 2-methoxy-3,5-dimethylpyrazine, a potent musty compound from wine corks. *J. Agric. Food Chem.* 52: 5425-5430.
- [102] Snowdon, E.M., Bowyer, M.C., Grbin, P.R., and Bowyer, P.K. (2006). Mousy off-flavor: A review. *J. Agric. Food Chem.* 54: 6465-6474. Strauss, C.R., and Heresztyn, T. (1984). 2-Acetyltetrahydropyridines - a Cause of the Mousy Taint in Wine. *Chemistry & Industry*: 109-110.
- [103] Strauss, C.R., Wilson, B., Anderson, R., and Williams, P.J. (1987). Development of Precursors of C-13 nor-Isoprenoid Flavorants in Riesling Grapes. *Am. J. Enol. Vitic.* 38: 23-27.
- [104] Swiegers, J.H., Bartowsky, E.J., Henschke, P.A., and Pretorius, I.S. (2005). Yeast and bacterial modulation of wine aroma and flavour. *Aust. J. Grape Wine Res.* 11: 139-173.
- [105] Tominaga, T., BaltenweckGuyot, R., DesGachons, C.P., and Dubourdieu, D. (2000). Contribution of volatile thiols to the aromas of white wines made from several *Vitis vinifera* grape varieties. *Am. J. Enol. Vitic.* 51: 178-181.
- [106] Tominaga, T., Darriet, P., and Dubourdieu, D. (1996). Identification del'acétate de 3-mercaptohexanol, composé a forte odeur de buis, intervenant dans l'arome des vins de Sauvignon. *Vitis* 35: 207-210.
- [107] Tominaga, T., and Dubourdieu, D. (2006). A novel method for quantification of 2-methyl-3-furanthiol and 2-furanmethanethiol in wines made from *Vitis vinifera* grape varieties. *J. Agric. Food Chem.* 54: 29-33.

- [108] Tominaga, T., Guimbertau, G., and Dubourdieu, D. (2003). Contribution of benzenemethanethiol to smoky aroma of certain *Vitis vinifera* L. wines. *J. Agric. Food Chem.* 51: 1373-1376.
- [109] Tominaga, T., Guimbertau, G., and Dubourdieu, D. (2003). Role of certain volatile thiols in the bouquet of aged Champagne wines. *J. Agric. Food Chem.* 51: 1016-1020.
- [110] Tominaga, T., Murat, M.L., and Dubourdieu, D. (1998). Development of a method for analyzing the volatile thiols involved in the characteristic aroma of wines made from *Vitis vinifera* L. Cv Sauvignon Blanc. *J. Agric. Food Chem.* 46: 1044-1048.
- [111] Tsachaki, M., Linforth, R.S.T., and Taylor, A.J. (2005). Dynamic headspace analysis of the release of volatile organic compounds from ethanolic systems by direct APCI-MS. *J. Agric. Food Chem.* 53: 8328-8333.
- [112] Van Wyk, C.J., Augustyn, O.P.H., De Wet, P., and Joubert, W.A. (1979). Isoamyl acetate, a key fermentation volatile of wines of *Vitis vinifera* cv. Pinotage. *Am. J. Enol. Vitic.* 30: 167-173.
- [113] Versini, G., Orriols, I., and Dallaserra, A. (1994). Aroma Components of Galician Albarino, Loureira and Godello Wines. *Vitis* 33: 165-170.
- [114] Vilanova, M., and Sieiro, C. (2006). Determination of free and bound terpene compounds in Albarino wine. *J. Food Com. Anal.* 19: 694-697.
- [115] Winterhalter, P. (1991). 1,1,6-Trimethyl-1,2-Dihydronaphthalene (Tdn) Formation in Wine .1. Studies on the Hydrolysis of 2,6,10,10-Tetramethyl-1-Oxaspiro 4.5 Dec-6-Ene-2,8-Diol Rationalizing the Origin of Tdn and Related C-13 Norisoprenoids in Riesling Wine. *J. Agric. Food Chem.* 39: 1825-1829.