

Estrategias de monitorización analítica rápida en la elaboración de sidra: medidas químicas y preventivas frente a las alteraciones microbiológicas

Dr. Simone Bellassai - Químico Enólogo, experto en análisis químico de alimentos y bebidas - CDR FoodLab® Division Manager P2623

1. Introducción: desafíos bioquímicos y vulnerabilidad tecnológica del mosto de manzana

La producción de sidra de alta calidad requiere un control riguroso de los complejos procesos bioquímicos y enzimáticos que gobiernan la transformación de la materia prima. En comparación con el mosto de uva, el zumo de manzana presenta una marcada susceptibilidad a los fenómenos oxidativos y una concentración de nutrientes nitrogenados que a menudo resulta limitante para el metabolismo de las levaduras. Estos desafíos tecnológicos son especialmente evidentes en el perfil de la sidra de Hardanger. El uso de cultivares de manzana de mesa como *Summerred*, *Aroma*, *Discovery* y *Gravenstein* tiene como objetivo obtener un producto final fresco y ligero, pero impone estrictas limitaciones químicas debido a la reducida concentración fenólica y, en algunos casos, a valores de acidez elevados.

En este contexto, la optimización del proceso exige superar una lógica de intervención *ex post*, necesariamente limitada a la corrección de alteraciones organolépticas ya manifestadas, en favor de una estrategia analítica de tipo predictivo y preventivo. La monitorización analítica sistemática permite identificar de forma temprana las desviaciones metabólicas antes de que se traduzcan en defectos irreversibles. Tanto en condiciones de fermentación dirigida como en regímenes seminaturales, el análisis constante de los parámetros químicos representa una herramienta fundamental para garantizar la estabilidad fisicoquímica de la sidra. Hoy en día, la transición hacia este modelo predictivo se ve facilitada por la introducción de sistemas analíticos optimizados, como el sistema **CDR CiderLab**, que permiten realizar cribados multiparamétricos directamente en la línea de producción, eliminando los tiempos de espera asociados al laboratorio externo.

Parámetro	Umbral crítico	Riesgo	Acción correctiva	Momento recomendado
Nitrógeno asimilable por las levaduras (NAL, YAN)	100 mg/L	Ralentizaciones o paradas de la fermentación; síntesis de sulfuro de hidrógeno (H ₂ S), con defecto de reducción y olor a huevo podrido.	Aporte calibrado de sales de amonio, como fosfato diamónico (DAP), o de nutrientes orgánicos complejos.	Fase prefermentativa, antes de la inoculación.
Ácido acético (acidez volátil)	0.6 g/L	Picado acético; producción de acetato de etilo, con olor a disolvente o pegamento.	Eliminación del espacio de cabeza en los depósitos mediante rellenado; reintegración específica de SO ₂ libre.	Fase de almacenamiento o keeving; monitorización para detectar tendencias de aumento.
Anhídrido sulfuroso (SO ₂) y pH	pH > 3.8	Ineficacia del SO ₂ ; desarrollo de <i>Brettanomyces spp.</i> y <i>Saccharomyces ludwigii</i> , con formación de agregados celulares.	Corrección preliminar de la acidez con ácido málico para devolver el pH a valores < 3,8 antes de la sulfitación.	Antes de la sulfitación y durante el almacenamiento.
Ácido L-málico	< 0.5 g/L al final de la fermentación; sidras frescas/nórdicas: 4.0-6.0 g/L	Fermentación maloláctica (FML) espontánea tras el embotellado, con turbidez y sobrepresión; pérdida de frescura en variedades de baja acidez.	Trasiegos; estabilización con anhídrido sulfuroso (SO ₂); posible acidificación exógena si pH > 3,8.	Durante la degradación del ácido málico y antes del envasado.
Azúcares residuales	Dependiente del estilo, desde < 2,0 g/L para sidra seca hasta 40,0 g/L para sidra dulce.	Sobre-atenuación con pérdida de cuerpo, o fermentaciones secundarias en botella con sobrecarbonatación y riesgo de rotura.	Trasiegos para detener la fermentación; chaptalización con sacarosa para crear una barrera alcohólica de 6-7 % vol.	Fase tardía de la fermentación y antes del embotellado.

Tabla 1 — Mapa de los parámetros críticos en el control de proceso de la sidra

2. Nitrógeno asimilable por las levaduras (NAL): regulación de la cinética fermentativa

El nitrógeno asimilable por las levaduras (NAL), constituye el principal factor limitante de la cinética fermentativa en el mosto de manzana. Una disponibilidad insuficiente de esta fracción nutricional no solo provoca ralentizaciones o paradas de la fermentación alcohólica, sino que también actúa como desencadenante bioquímico de desviaciones importantes en el perfil aromático. La deficiencia de NAL compromete la síntesis proteica, incluida la de los complejos enzimáticos de la biomasa celular. En condiciones de estrés nutricional, el metabolismo de la levadura activa la vía de reducción de sulfatos y sulfitos, provocando la síntesis y liberación de sulfuro de hidrógeno (H_2S), un compuesto volátil que confiere a la sidra desagradables notas sulfurosas, asociadas al olor a huevo podrido y expresión del defecto de reducción. Además, una cinética fermentativa excesivamente débil prolonga los tiempos de permanencia del mosto, incrementando de forma exponencial el riesgo de oxidaciones tempranas y el desarrollo de microorganismos contaminantes. La monitorización analítica requiere la determinación cuantitativa del NAL total, expresado como suma del nitrógeno amoniacal, de naturaleza inorgánica, y del nitrógeno amínico libre, de naturaleza orgánica y también denominado FAN. Esta determinación debe realizarse necesariamente en la fase prefermentativa. Mediante el método enzimático rápido de CDR CiderLab, este dato se obtiene en pocos minutos y sin necesidad de pretratamientos complejos de la muestra, lo que permite al tecnólogo mapear en tiempo real la disponibilidad nutricional real del lote. Los análisis realizados en cultivares de la región de Hardanger muestran una fuerte variabilidad y niveles a menudo insuficientes, desde un mínimo de 0,8 mg/L en la variedad *Discovery* hasta un máximo de 101 mg/L en *Summerred*. El umbral técnico de seguridad para garantizar el metabolismo basal de la levadura y una cinética fermentativa regular se estima en 100 mg/L de NAL. Si el ensayo analítico evidencia una concentración inferior a dicho valor límite, es necesario proceder, antes de la inoculación, al aporte calibrado de sales de amonio, como el fosfato diamónico (DAP), o de nutrientes orgánicos complejos.

3. Ácido L-málico y ácido L-láctico: control de la fermentación maloláctica (FML)

El ácido L-málico constituye el principal pilar de la acidez fija en el mosto de manzana, con picos que

alcanzan los 22,1 g/L en la variedad *Aroma*. La monitorización de su degradación y de su conversión simultánea en ácido L-láctico mediante fermentación maloláctica (FML) es un requisito crítico para la estabilidad del producto. Una FML espontánea después del embotellado puede arruinar la sidra, causando turbidez, aromas desagradables y una peligrosa sobrepresión de CO_2 . Por el contrario, si se deja actuar libremente en variedades que ya presentan baja acidez, puede reducir de forma significativa la frescura del producto.

La determinación cuantitativa del ácido málico mediante pruebas enzimáticas y fotométricas optimizadas en la plataforma CDR CiderLab permite mapear las cinéticas de degradación con precisión analítica y tiempos de respuesta inmediatos. Monitorizar este parámetro es esencial debido a las marcadas diferencias entre cultivares: el ácido málico disminuye un 70 % en *Gravenstein*, pero apenas un 9 % en *Summerred*. Un análisis oportuno guía al productor en decisiones de proceso decisivas, como cuándo realizar los trasiegos y cuándo bloquear el proceso con anhídrido sulfuroso (SO_2). Además, en mostos con $pH > 3,8$, la acidificación exógena con ácido málico actúa como medida preventiva, restableciendo el equilibrio organoléptico e incrementando la fracción de SO_2 molecular activa frente a las contaminaciones microbianas.

4. Acidez volátil (ácido acético): monitorización preventiva del picado acético

El ácido acético es el principal indicador de la acidez volátil: refleja la limpieza de la línea de producción y la correcta gestión del oxígeno, especialmente durante fases delicadas como el almacenamiento o el *keeving*. Si este valor aumenta sin control, la sidra queda expuesta al riesgo de picado acético. Esta alteración suele ir acompañada de la producción de acetato de etilo, que deteriora el producto con desagradables olores a disolvente y pegamento. Este defecto está estrechamente relacionado con la actividad metabólica temprana de bacterias acéticas o de levaduras apiculadas oportunistas, entre ellas *Hanseniaspora valbyensis* (sin. *Kloeckera apiculata*), cuya proliferación se ve favorecida por la presencia de oxígeno y por concentraciones de anhídrido sulfuroso (SO_2) inferiores al umbral mínimo de inhibición.

La monitorización analítica cuantitativa actúa como un sistema de alerta temprana, ya que permite detectar desviaciones cinéticas antes de que el defecto sea perceptible por vía olfativa. Mediante el uso del sistema CDR CiderLab, la cuantificación del

ácido acético puede realizarse en **10 minutos** a través de una reacción enzimática sobre microcantidades de muestra. Aunque el umbral técnico de aceptabilidad se fija en un máximo de 0,6 g/L, las sidras caracterizadas por un elevado estándar cualitativo presentan valores estables y próximos al límite de cuantificación instrumental. El enfoque preventivo se basa en la identificación de cualquier tendencia de crecimiento. La evidencia analítica de un incremento exige la adopción inmediata de medidas de contención, como la eliminación del espacio de cabeza en los depósitos mediante rellenado y la reintegración específica de SO₂ libre.

5. Anhídrido sulfuroso (SO₂): la química de la protección selectiva

El anhídrido sulfuroso (SO₂) representa el principal agente de selección microbiológica y protección antioxidante en el proceso de elaboración de sidra. La eficacia de este aditivo está estrechamente condicionada por el pH del medio, que gobierna su equilibrio químico en solución. En medios poco ácidos (pH > 3,8), típicos de los mostos obtenidos a partir de cultivares de manzana *bittersweet*, donde pueden registrarse valores de hasta pH 4,2, la fracción activa de anhídrido sulfuroso se reduce drásticamente. Esta condición expone el producto a graves alteraciones durante el almacenamiento inducidas por levaduras contaminantes y resistentes, como *Brettanomyces spp.* y *Saccharomyces ludwigii*. Esta última es conocida por su capacidad de generar densos agregados celulares en el fondo de las botellas, comprometiendo la estabilidad visual de la sidra. El protocolo de control debe centrarse en la monitorización analítica combinada del **SO₂ libre** y **total** y del **valor de pH**. A medida que aumenta el pH, el equilibrio del anhídrido sulfuroso se desplaza hacia las formas bisulfito y sulfito, reduciendo la fracción de SO₂ molecular, la única forma capaz de atravesar la membrana celular de los microorganismos y ejercer una acción biocida. A un valor de pH 4,2, una dosificación estándar de 150 mg/L resulta biológicamente ineficaz. Por tanto, el enfoque preventivo exige la corrección preliminar de la acidez mediante la adición exógena de ácido málico, con el fin de devolver el mosto a valores inferiores a pH 3,8 antes de la sulfitación.

6. Azúcares residuales y densidad: gestión de la estabilidad en botella

La determinación de la densidad relativa, o *specific gravity* (SG), y la monitorización analítica de la relación glucosa/fructosa representan parámetros fundamentales para estimar la graduación

alcohólica final y controlar la presión parcial de CO₂ endógeno en el producto envasado. Las cepas de *Saccharomyces cerevisiae* metabolizan preferentemente la glucosa y dejan la fructosa como componente mayoritario de la fracción glucídica tardía. Un desarrollo fermentativo sin control, con agotamiento total de los azúcares, es decir, sobre-atenuación, priva a la sidra de cuerpo y redondez en boca. Por el contrario, la permanencia de azúcares residuales no biológicamente estables expone el lote al riesgo de cinéticas secundarias tardías tras el embotellado. Este fenómeno induce defectos de sobrecarbonatación incontrolada e incrementa la presión interna.

Desde el punto de vista analítico, la evaluación de la densidad relativa requiere integrarse con el mapeo cuantitativo del perfil de azúcares residuales. La **determinación rápida de las fracciones glucídicas individuales, es decir, glucosa, fructosa y sacarosa**, realizable con CDR CiderLab, permite validar el dato densimétrico y guiar con precisión las operaciones de trasiego necesarias para detener la fermentación. Aquí entra en juego la chaptalización: añadir sacarosa para elevar el alcohol al 6–7 % vol sirve para crear una verdadera barrera microbiológica. El alcohol adicional, junto con el pH ácido y el SO₂, protege los azúcares que quedan en la botella frente a fermentaciones no deseadas, garantizando así la estabilidad del producto.

7. Conclusiones

En la elaboración moderna de sidra (*cidermaking*), los análisis en la línea de producción no son un coste ni una complicación, sino una elección estratégica indispensable para proteger el producto y valorizar cada lote. La capacidad de transformar la intuición artesanal en precisión científica cuantificable representa el único medio para prevenir la pérdida parcial o total de lotes productivos, garantizando al mismo tiempo la constancia cualitativa y la reconocibilidad sensorial exigidas por el mercado global.

En este marco de evolución metodológica, el sistema **CDR CiderLab** se configura como una **solución analítica optimizada para el control de proceso**. Gracias a pruebas fotométricas en cubetas prerellenadas, el sistema supera las limitaciones operativas del laboratorio químico tradicional: elimina la necesidad de calibraciones complejas, reduce drásticamente la manipulación de reactivos y requiere exclusivamente microvolúmenes de muestra, evitando pasos previos laboriosos de filtración o centrifugación. Su elevada rapidez de ejecución permite adoptar medidas correctivas

inmediatas directamente en el entorno de producción.

Sitografía y recursos institucionales internacionales

Estos enlaces representan las principales plataformas de investigación, servicios de extensión universitaria e institutos técnicos dedicados a la ciencia de la elaboración de sidra:

- **ScienceDirect Topics – Cider (*Agricultural and Biological Sciences*)** Recurso enciclopédico y científico para la consulta de capítulos de libros y artículos de revisión sobre la bioquímica de la sidra.

Link: <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/cider>

- **Cornell AgriTech (Cornell University) – Hard Cider Products & Research** Centro académico de excelencia para el estudio de cultivares, fermentación y desarrollo tecnológico de la cadena de valor de la sidra.

Link: <https://cals.cornell.edu/cornell-agritech/products-we-research/hard-cider>

- **Agriculture Institute – Industrial Cider Production Techniques & Technology** Portal técnico centrado en la química de los alimentos, la fisiología de los microorganismos y las prácticas modernas de bodega a escala industrial.

Link: <https://agriculture.institute/food-chemistry-and-physiology/industrial-cider-production-techniques-technology/>

- **The Wittenham Hill Cider Pages (Andrew Lea) – Cider and Perry Making** Uno de los recursos históricos, técnicos y científicos de referencia para los protocolos tradicionales y modernos de elaboración de sidra.

Link: <https://www.cider.org.uk/frameset.htm>

- **Washington State University (WSU) – Cider Research & Extension** Programa universitario especializado en el análisis de matrices frutales, ensayos de fermentación y estabilidad microbiológica de la sidra.

Link: <https://cider.wsu.edu/>

- **Cider Institute of North America (CINA)** Organización de referencia para la formación profesional, la estandarización de parámetros fisicoquímicos y las certificaciones en cidermaking.

Link: <https://www.ciderinstitute.com/>