

Seguridad de la leche y tratamientos térmicos: la eficacia de la prueba de fosfatasa alcalina (ALP) con CDR FoodLab®

Dra. Simone Pucci - Jefa del Laboratorio Químico CDR "Francesco Bonicolini"

P2622

1. Introducción e importancia bioquímica de la fosfatasa alcalina (ALP)

En la industria láctea, la fosfatasa alcalina (ALP) no es simplemente una enzima endógena, sino que representa el **pilar analítico fundamental** para validar la seguridad microbiológica. Como **indicador intrínseco de tiempo y temperatura**, la ALP actúa como un marcador bioquímico cuya inactivación señala el éxito del tratamiento térmico, protegiendo la salud pública y garantizando el cumplimiento de la normativa.

Definición y cinética enzimática

La fosfatasa alcalina es una enzima presente de forma natural en la leche cruda de diversas especies (**bovina, ovina y caprina**). Su función bioquímica radica en la ruptura de grupos fosfato en un entorno alcalino (pH óptimo de **8 a 10**). La importancia estratégica de la ALP como indicador de proceso reside en su **termorresistencia**, ligeramente superior a la de los patógenos no esporulados más críticos para la salud humana.

En cuanto a la resistencia al calor, la curva de inactivación térmica de la fosfatasa alcalina presenta una característica cinética que la industria láctea ha aprovechado como indicador de proceso: su temperatura de desnaturalización se sitúa justo por encima de la de los microorganismos patógenos no esporulantes más críticos para la salud humana. Entre ellos, destaca *Mycobacterium tuberculosis*, históricamente utilizado como referencia para definir parámetros mínimos de tratamiento, y especialmente *Coxiella burnetii* (el agente causal de la fiebre Q), ahora universalmente reconocido como el patógeno no formador de esporas más resistente al calor presente en la leche cruda.

El principio fundamental del "**margen de seguridad**" se basa precisamente en esta peculiaridad bioquímica: dado que la ALP puede soportar combinaciones de tiempo y temperatura ligeramente superiores a las de estas bacterias, su inactivación completa garantiza la eliminación efectiva de la carga patógena objetivo. Es importante destacar que un resultado negativo en la prueba de ALP es el indicador específico de la destrucción de las formas vegetativas bacterianas, pero no garantiza la ausencia de microorganismos formadores de esporas, que requieren tratamientos térmicos más severos (como el UHT). No obstante, la prueba constituye una prueba legal y técnica de que se han alcanzado los parámetros mínimos de

pasteurización establecidos por la normativa (72 °C durante 15 segundos o 63 °C durante 30 minutos), lo que confirma la seguridad microbiológica de la leche fresca comercializada.

2. Control de los tratamientos térmicos en el proceso de producción

La pasteurización representa el **punto crítico de control (PCC)** por excelencia en una planta. Una gestión ineficiente de este parámetro no solo compromete la seguridad, sino que también expone a la empresa a riesgos financieros derivados de cuellos de botella logísticos y retiradas de productos.

Prevención de riesgos, variabilidad interespecífica y límites regulatorios

El monitoreo riguroso de la fosfatasa alcalina (ALP) responde principalmente a imperativos de salud pública, actuando como un baluarte fundamental para prevenir la transmisión de patógenos responsables de enfermedades graves transmisibles a los humanos (zoonosis) y garantizar la seguridad del producto final. Sin embargo, la eficacia de este control requiere un conocimiento profundo de la variabilidad entre especies. Los niveles basales de ALP varían drásticamente según la especie animal: la leche de oveja tiene una actividad enzimática inicial aproximadamente tres veces mayor que la leche de vaca, mientras que la leche de cabra presenta niveles hasta cinco veces menores. En consecuencia, adoptar un enfoque analítico estandarizado sin una calibración específica para cada especie conlleva el riesgo de generar información engañosa y de ser comercialmente inseguro.

Esta complejidad biológica se ve agravada por estrictos parámetros legales. Para la leche de vaca, el umbral de seguridad internacional se sitúa en 350 mU /L (miliunidades por litro), superado el cual la prueba indica instantáneamente una pasteurización insuficiente o una recontaminación posterior al procesamiento con leche cruda. La sensibilidad de este marcador bioquímico es tan alta que puede detectar incluso porcentajes ínfimos de leche sin tratar, entre el 0,02 % y el 0,1 %, protegiendo así toda la línea de producción de la contaminación cruzada.

El fenómeno de la "reactivación" (reactivación enzimática)

Un fenómeno bioquímico complejo que supone un reto para los laboratorios de control de calidad es la

reactivación de la fosfatasa alcalina (ALP). Esta anomalía se produce con frecuencia en productos con alto contenido graso, como la nata, o en leche sometida a tratamiento UHT y posteriormente almacenada a temperaturas superiores a 30 °C, especialmente en presencia de sales de magnesio. Un operador de sector debe ser capaz de distinguir una verdadera falla del pasteurizador de un fenómeno de reactivación o de la presencia de ALP microbiana, producida por bacterias termorresistentes. En este contexto, el análisis sigue dos vías distintas. La prueba de repasteurización (realizada en el laboratorio a 63 °C durante 30 minutos) permite aislar la ALP microbiana: al ser altamente termoestable, su actividad no disminuirá significativamente después del tratamiento, a diferencia de la ALP nativa de la leche, que se destruirá. Para diferenciar la ALP residual (debido a una pasteurización fallida) de la ALP reactivada, se utiliza la prueba de activación con magnesio, comparando los niveles incrementados de la enzima en condiciones controladas y, por lo tanto, descartando por completo un falso positivo o una falla técnica real en el sistema. Por lo tanto, resulta evidente que la monitorización de la fosfatasa alcalina es crucial para la seguridad y el cumplimiento normativo. La gestión de numerosas variables en tiempo real exige una capacidad de respuesta analítica que los métodos de laboratorio tradicionales, a menudo lentos y complejos, no logran garantizar. Para implementar dinámicas *de liberación positiva eficientes* y evitar cuellos de botella durante el almacenamiento, es fundamental adoptar soluciones analíticas capaces de transferir la precisión del laboratorio oficial directamente a la planta de producción.

3. Análisis de ALP con el sistema CDR FoodLab®

El **sistema CDR FoodLab®** es capaz de transferir la precisión de la fluorimetría oficial directamente a la línea de producción mediante un enfoque rápido e intuitivo, optimizado para cualquier tipo de operador. Superando la complejidad de los métodos tradicionales, esta solución para la **determinación de la fosfatasa alcalina** elimina las dificultades operativas gracias al uso de reactivos pre-ensados y listos para usar. El análisis se completa en solo **25 minutos** y permite el **procesamiento simultáneo de múltiples muestras**, reduciendo así aún más el tiempo de análisis y obteniendo resultados sin necesidad de personal especializado ni calibraciones laboriosas. El instrumento opera en un **rango de medición de De 0,1 a 7 U/L**, con una **resolución fina de 0,01 U/L** y una **repetibilidad de 0,12 U/L**. Esta versatilidad transforma el sistema

en una plataforma analítica completa: la monitorización eficiente de ALP se puede integrar simultáneamente con el control de otros parámetros químicos clave, ofreciendo al usuario una visión integral de la calidad de la materia prima y la integridad del proceso de producción.

Más allá de ALP: Detección integrada con CDR FoodLab®

En la misma plataforma de análisis, puede supervisar:

- **Peroxidasa (POD):** Fundamental para detectar la sobrepasteurización. Un resultado **positivo de POD** es el objetivo: demuestra que la leche no ha sufrido un estrés térmico excesivo, conservando así su valor nutricional y sus proteínas.
- **Furosina/Fructosil-lisina:** Un indicador clave del tratamiento térmico y la frescura. Un nivel bajo de furosina garantiza la ausencia de tratamientos térmicos excesivos o la adición de leche en polvo reconstituida, asegurando así la integridad de los aminoácidos esenciales.
- **Ácido láctico:** Un indicador de higiene primaria. Un nivel bajo de ácido láctico demuestra la calidad de la materia prima que posteriormente se someterá a tratamiento térmico.
- **Urea y amoníaco:** indicadores de la salud bovina y la eficiencia alimenticia, esenciales para el seguimiento de la cadena de suministro.

4. Conclusiones

En conclusión, **el monitoreo de la fosfatasa alcalina** sigue siendo crucial para validar los tratamientos térmicos y proteger la salud pública en la industria láctea. La evolución tecnológica que representa el **sistema CDR FoodLab®** demuestra cómo ahora es posible combinar el rigor científico de los métodos oficiales con la velocidad y flexibilidad que requieren las líneas de producción modernas. Además, la capacidad de ampliar el análisis más allá de la fosfatasa alcalina en la misma plataforma —integrando el análisis en tiempo real de **peroxidasa, furosina (fructosil-lisina), ácido láctico, urea y amoníaco**— permite a la planta ir más allá de simples controles de cumplimiento. El control de calidad permite proteger el valor nutricional de las materias primas, optimizar los procesos de la empresa y aumentar la seguridad del consumidor.

Bibliografía / Referencias bibliográficas

Punoo, HA (2018). Validación de la pasteurización de productos lácteos mediante la actividad de la fosfatasa alcalina. *Concepts of Dairy & Veterinary Sciences* , 1(3), 78-89. Lupine Publishers. DOI: 10.32474/CDVS.2018.01.000113

Departamento de Ciencia de los Alimentos de la Universidad de Cornell. (2022). *Prueba de fosfatasa alcalina (ALP) para la pasteurización de la leche* . Notas científicas sobre productos lácteos (Versión 11-07). Universidad de Cornell, Ithaca, Nueva York.