

# MONITORIZACIÓN MEDIANTE OBJETOS CONECTADOS EN RED Y BIGDATA EN LA PRODUCCIÓN DE VINOS

## CONTROL DE FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA Y CRIANZA DEL VINO

Carlos Sánchez-Mateos\*, Sergi de Lamo, Alba Domènech, Miquel Puxeu, Enric Nart, Inés Horcajo

Centre Tecnològic del Vi (VITEC). Ctra. Porrera, km 1, Falset 43730

\* E-mail: [carlos.sanchez@vitec.wine](mailto:carlos.sanchez@vitec.wine)

La industria del vino está experimentando una transformación significativa, impulsada por avances tecnológicos que mejoran la precisión en su elaboración y conservación. En este contexto, la implementación de sensores de bajo coste y tecnologías de comunicación inalámbrica ha permitido el desarrollo de sistemas de monitorización en tiempo real, enmarcados en el concepto del Internet de las Cosas (IoT) (Cañete *et al.*, 2018). Estas innovaciones optimizan los procesos enológicos y proporcionan a los enólogos herramientas efectivas para supervisar las condiciones de las barricas y otros parámetros críticos, lo que asegura la calidad y consistencia del vino (Kovačević *et al.*, 2021).

La revolución tecnológica en la enología ha permitido avances significativos en la monitorización del proceso de producción del vino. Por ejemplo, se utilizan sensores ultrasónicos y micrófonos para mantener un nivel constante de espacio vacío en los barriles, asegurando así la calidad del vino (Pambudi *et al.*, 2021).

Además, se ha desarrollado un microanalizador miniaturizado que permite monitorizar el potasio sin necesidad de pretratamiento de muestras (Calvo-López *et al.*, 2021). También se han implementado sensores de bajo coste que miden la temperatura, la acidez (pH), el alcohol y los gases liberados durante la fermentación (Angelkov *et al.*, 2017). Estos valores se registran y envían en tiempo real a un servidor, facilitando un control preciso del proceso y garantizando la calidad del producto final.

Durante la fermentación, la monitorización de factores como la densidad y la temperatura es importante para desarrollar sabores deseables. Técnicas no destructivas, como el infrarrojo cercano y la nariz electrónica, permiten un control en línea de estos parámetros y facilitan la creación de modelos predictivos (Littarru *et al.*, 2024). En la crianza, la gestión del oxígeno disuelto y gaseoso, así como de la humedad y la temperatura, es esencial.

Para un control efectivo, se han implementado sistemas automatizados que permiten a los enólogos monitorizar en tiempo real estos factores críticos, optimizando la producción y apoyando a los pequeños productores (Ranasinghe *et al.*, 2013). En este contexto, el uso de sensores como el Densios, desarrollado por ONAFIS, se destaca por su capacidad de medir continuamente la densidad, temperatura y oxígeno disuelto. Esto no solo mejora la eficiencia y calidad del vino, sino que también reduce el tiempo dedicado a muestreos manuales, optimizando el uso de insumos y reforzando la seguridad en el proceso de elaboración (Figura 1).

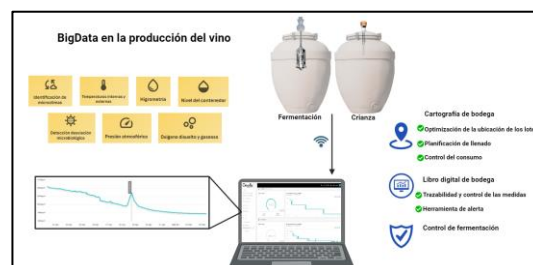


Figura 1: Infografía del proyecto de monitorización mediante objetos conectados en red y BigData en la producción de vinos

El proyecto ha sido fundamental para el avance en la monitorización de los procesos enológicos, destacándose por un conjunto

integral de actividades que han permitido un seguimiento exhaustivo de la fermentación en diversas bodegas. Este enfoque ha facilitado una monitorización rigurosa y efectiva del proceso.

En primer lugar, se han utilizado sensores de densidad, que miden de manera precisa la densidad del mosto, así como la temperatura y la cinética de fermentación.



Figura 2: Sensores densios encargados de medir densidad y temperatura

Además, se han implementado sensores ambientales que monitorizan parámetros como la higrometría, la presión atmosférica y las temperaturas internas y externas. La capacidad de estos sensores para identificar microclimas dentro de las bodegas es importante para el control del envejecimiento del vino, ya que las condiciones ambientales influyen directamente en la calidad del producto final.

Asimismo, se han incorporado sensores de oxígeno disuelto, que permiten medir el nivel de oxígeno en el vino. Este factor es crítico, dado que un control adecuado del oxígeno es determinante para la estabilidad y calidad del vino (Gómez-Plaza *et al.*, 2019). Complementariamente, se ha establecido un sistema de aviso para el control del riesgo microbiológico, con especial atención a *Brettanomyces*, una levadura que puede comprometer la calidad del vino. Este sistema asegura que cualquier desviación se detecte y se gestione de manera oportuna. Además, se han implementado tecnologías avanzadas para el análisis de fenómenos oxidativos durante el envejecimiento del vino, así como un control detallado de las

condiciones ambientales que afectan el proceso de crianza.

## Seguimiento en continuo de la fermentación alcohólica

El **seguimiento continuo de la fermentación alcohólica** es fundamental para optimizar la producción y garantizar la calidad del producto final. En este contexto, se llevaron a cabo nueve microvinificaciones en **VITEC**, donde se monitorizaron fermentaciones en depósitos con capacidad de 30 litros y se realizaron mediciones de densidad y temperatura cada hora (Figura 3).

Las mediciones de densidad, tanto manuales como automáticas, mostraron una alta correlación, validando ambos métodos y sugiriendo un proceso uniforme. En las fermentaciones espontáneas, la densidad se estabilizó alrededor de 1010 Kg/m<sup>3</sup>, lo que indica el cese del proceso fermentativo.



Figura 3: Ejemplo de seguimiento de densidad de las vinificaciones de Chardonnay inoculadas con *Saccaromyces cerevisiae* durante la fermentación alcohólica medido manualmente con densímetros y con sensores Densios

Además, se realizaron 32 seguimientos de fermentación en diversas bodegas catalanas, lo que permitió validar la efectividad de los sensores en diferentes condiciones. En el **primer caso**, se instalaron densímetros en depósitos de 100 hectolitros, logrando cinéticas de fermentación favorables y datos de temperatura consistentes. Este enfoque resultó en una monitorización precisa, lo que permitió ajustar las condiciones de fermentación en tiempo real.

En el **segundo caso**, se realizó un seguimiento de un vino dulce natural, en el cual se aplicó una estrategia de enfriamiento para detener la fermentación. Esta intervención aseguró la calidad del producto final al prevenir fermentaciones indeseadas, gracias a la regulación de la temperatura basada en los datos obtenidos, lo que optimizó el proceso en su totalidad (Figura 4).



Figura 4: Ejemplo de seguimiento de la densidad y la temperatura durante la fermentación alcohólica medidos con densímetros en bodega externa para la elaboración de vino dulce natural

En un **tercer escenario**, se implementaron densímetros en mostos de variedades como Macabeo y Garnacha Blanca, obteniendo datos de fermentación satisfactorios en depósitos de 1000 litros. Estos resultados corroboraron la eficacia del sistema de monitoreo, ya que se observaron patrones de fermentación consistentes que facilitaron la toma de decisiones durante el proceso.

Adicionalmente, en un **cuarto caso** se evidenció que los registros automáticos superaron la precisión de las mediciones manuales, lo que subraya la robustez del sistema de monitoreo. Esta superioridad en la recolección de datos no solo mejoró la eficiencia, sino que también permitió a los productores realizar ajustes más informados y oportunos.

En resumen, el seguimiento continuo de fermentaciones a través de estos casos ha demostrado la eficacia de la tecnología de monitoreo. Los resultados obtenidos son comparables entre métodos automáticos y manuales, y las mejoras en la conexión y transmisión de datos han optimizado el control del proceso, contribuyendo significativamente a la calidad del producto final y estableciendo bases sólidas para futuras investigaciones en el ámbito de la fermentación alcohólica.

## Análisis en continuo de los fenómenos oxidativos

Por otro lado, se llevó a cabo un análisis exhaustivo del envejecimiento del vino, centrado en los **fenómenos oxidativos** asociados a distintos depósitos de crianza, tales como ánforas, huevos y barricas. Para ello, se realizó un seguimiento de barricas en diversas bodegas, cada una con matrices vínicas distintas, con el objetivo de observar las variaciones en la concentración de oxígeno disuelto.

Con el fin de facilitar este análisis, se implementaron sensores inteligentes (B-EVOL) que permiten el monitoreo continuo del oxígeno disuelto, proporcionando a los enólogos herramientas valiosas para gestionar el envejecimiento del vino desde perspectivas microbiológicas y organolépticas. Adicionalmente, se desarrolló un **prototipo de doble sensor** de luminiscencia que mide tanto el oxígeno disuelto como el gaseoso en el espacio de cabeza del depósito, lo que permite obtener información detallada sobre la concentración de oxígeno (Figura 5).



Figura 5: Infografía del doble sensor capaz de medir la concentración de oxígeno gaseoso y disuelto

Se recopiló información sobre el tipo de barricas, las variedades de uva y la composición del vino con el propósito de determinar el aporte de oxígeno más adecuado según el perfil del producto buscado. En este contexto, **VITEC** llevó a cabo un ensayo entre abril y junio de 2024, en el cual se midió de forma conjunta el oxígeno disuelto y el gaseoso utilizando un innovador prototipo de sensor (Figura 6).

Durante el ensayo, el sensor N°2 inicialmente mostró niveles elevados de oxígeno disuelto; sin embargo, tras la inertización realizada el 7 de mayo, estos niveles disminuyeron y se estabilizaron por debajo de 0,150 mg/L. Este

resultado destaca la efectividad de las inertizaciones en el control de la oxidación, lo que es crucial para preservar la calidad del vino. Así, el prototipo no solo permitió medir las concentraciones de oxígeno, sino que también contribuyó al entendimiento de su impacto en el proceso de envejecimiento.

En contraste, el sensor N°3 mantuvo una concentración elevada de oxígeno disuelto, lo que podría aumentar el riesgo de oxidación. A pesar de esto, los niveles de oxígeno gaseoso se mantuvieron dentro de las recomendaciones de 3,000 mg/L. Estos resultados subrayan la eficacia de las estrategias de inertización, evidenciando su importancia en la protección del vino y la preservación de su calidad. Por lo tanto, este prototipo se presenta como una herramienta valiosa para el monitoreo enológico, facilitando un manejo más preciso de las condiciones de envejecimiento.

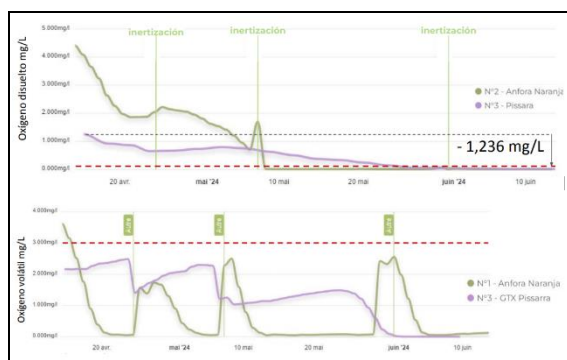


Figura 6: Ejemplo de evolución del oxígeno disuelto y gaseoso medido por dos sensores dobles prototipo del 14 de abril al 14 de junio de 2024 en dos ánforas con vino de garnacha blanca

Asimismo, se evaluó la hermeticidad de tres ánforas en dos bodegas externas. En una de las bodegas, se observó que un alto nivel de oxígeno disuelto y significativos intercambios de oxígeno indicaban una falta de hermeticidad, lo que aumentaba el riesgo de oxidación y contaminación microbiana. En la segunda bodega, aunque la temperatura interna fue superior a las recomendaciones, los niveles de oxígeno disuelto se mantuvieron estables, asegurando una crianza adecuada.

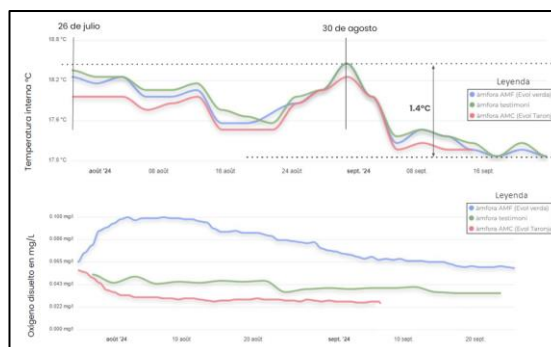


Figura 7: Ejemplo de evolución de temperatura interna y oxígeno disuelto en tres ánforas diferentes en la segunda bodega externa

En conclusión, este análisis ha demostrado la importancia del monitoreo continuo del oxígeno disuelto y gaseoso, utilizando tecnologías avanzadas como tapones inteligentes y sensores. Los hallazgos resaltan la necesidad de implementar estrategias adecuadas de inertización y un monitoreo constante para optimizar la calidad del vino, contribuyendo a la preservación de sus características organolépticas y minimizando los riesgos de oxidación y contaminación microbiana. Este estudio proporciona información valiosa para los enólogos y sienta las bases para futuras investigaciones en el campo del envejecimiento del vino.

## Control de las condiciones de envejecimiento

En la tercera fase del proyecto, se realizó un seguimiento detallado de las condiciones de crianza del vino en VITEC y bodegas externas, enfocándose en el control de factores ambientales que afectan el envejecimiento. El objetivo fue monitorizar la temperatura y la humedad en las bodegas, lo que permitió identificar oportunidades de mejora en los procesos de vinificación. Se analizó la evolución de las temperaturas internas, facilitando la identificación de tendencias y estableciendo correlaciones con la calidad organoléptica del vino y las condiciones meteorológicas del mes.

Durante esta fase, se registraron datos de temperatura y humedad en la sala de crianza de VITEC mediante sensores ubicados en tres ánforas y un huevo (Figura 8). Desde abril, se observó un aumento significativo en la temperatura externa de VITEC, con sensores N°1 y N°2 registrando incrementos superiores a 6°C. La temperatura media registrada fue de

18,2°C, superando los niveles recomendados de 8-15°C, lo que incrementa el riesgo de desviaciones microbiológicas y oxidación.

A pesar de que los sensores mostraron datos similares, se identificaron discrepancias entre las distintas ubicaciones. Además, la higrometría se mantuvo inestable, por debajo de las recomendaciones óptimas (80-95%), lo que no favorece la crianza del vino. Sin embargo, el uso de ánforas y el huevo en VITEC contribuyó a mitigar estos efectos negativos, proporcionando un entorno más controlado para el envejecimiento del vino.

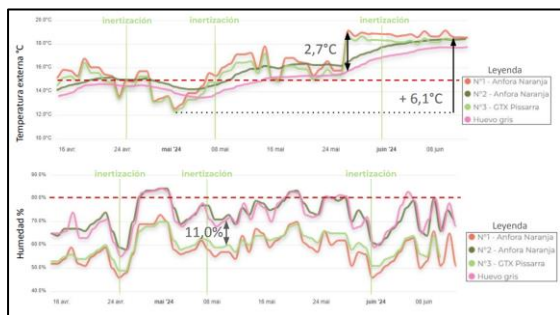


Figura 8: Evolución de la temperatura externa y la humedad en tres ánforas y un huevo en las instalaciones de VITEC desde el 16 de abril al 14 de junio de 2024

Por otro lado, en las **bodegas externas** se llevaron a cabo pruebas que incluyeron un análisis de temperatura y humedad construyendo así una cartografía de las características ambientales del espacio (Figura 9). En este caso, la temperatura media registrada fue de 17,9°C, con una amplitud de 1,1°C. Aunque se mantuvo homogénea, se observó una diferencia significativa cerca del sistema de frío. En relación con la higrometría, se mostró una media del 65,6%, lo que representa una disminución del 20%, aumentando así el riesgo de mermas y oxidación. Además, se registró un pico de humedad debido a lluvias, pero el nivel general se mantuvo por debajo de las recomendaciones.

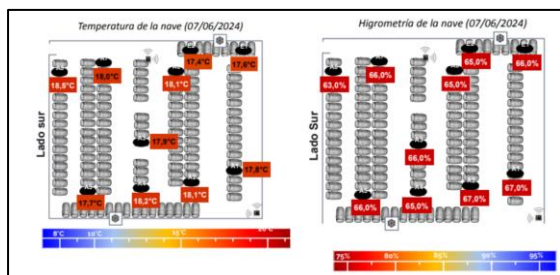


Figura 9: Cartografía de temperatura y humedad de la sala de crianza en una bodega externa

En resumen, el seguimiento sistemático de las condiciones de crianza en ambas instalaciones permite identificar tendencias y realizar ajustes en tiempo real, garantizando así la calidad del vino y minimizando riesgos asociados al envejecimiento. Esta fase del control de las condiciones de envejecimiento ha demostrado ser fundamental para optimizar los procesos de vinificación, ya que permite implementar estrategias correctivas en el vino.

### Control del riesgo microbiológico

En la última fase del proyecto, se ha desarrollado un sistema de aviso para bodegas que informa sobre el **riesgo de contaminación microbiológica**, específicamente por *Brettanomyces*, mediante un algoritmo avanzado. Este algoritmo integra datos de sensores que monitorean condiciones críticas como temperatura interna y externa, humedad, oxígeno disuelto y gaseoso, así como la proliferación de microorganismos a través de mediciones de luminiscencia.

En **VITEC**, se ha llevado a cabo un análisis utilizando la herramienta de riesgo microbiológico (RDM), que puede indicar un riesgo de proliferación microbiológica desde el inicio de la adquisición de datos (Figura 10). Los sensores N°1, N°2 y N°3, instalados en las ánforas, no han mostrado riesgos significativos. Sin embargo, se ha detectado un ligero aumento en el riesgo asociado al Huevo gris, aunque este incremento no se considera relevante. Se recomienda un contraanálisis si el riesgo supera el 40%. Además, se sugiere a las bodegas realizar un análisis exhaustivo del vino en estos casos para prevenir la proliferación de bacterias y de *Brettanomyces*. El algoritmo evalúa continuamente los datos de los sensores; si el riesgo supera el umbral establecido, se emite una alerta recomendando un análisis y ajustes en las condiciones ambientales.

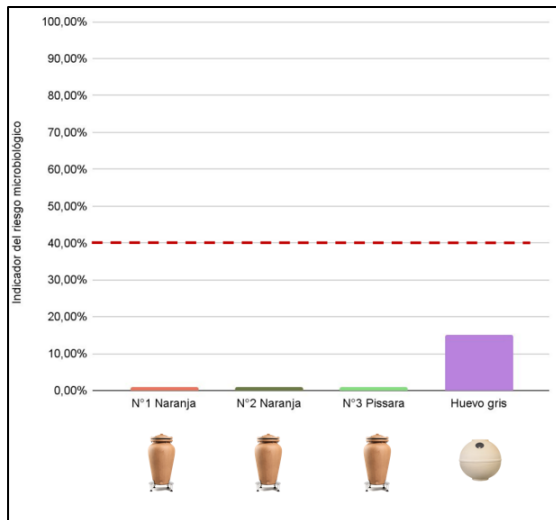


Figura 10: Indicador del riesgo microbiológico por adquisición en VITEC

Además, se han realizado pruebas en una bodega externa (Figura 11), revelando un aumento progresivo de la temperatura interna, que alcanzó niveles superiores a 16°C, lo que podría facilitar el crecimiento de microorganismos indeseables. También se registró un consumo de oxígeno disuelto de 0,109 mg/L, indicativo de actividad microbiana, aumentando así el riesgo de contaminación.

Los resultados mostraron un riesgo microbiológico del 55% en una barrica y del 65% en otra, lo que subraya la urgencia de implementar medidas correctivas. Paralelamente, se confirmó la alteración microbiológica ya que se analizaron muestras y se obtuvo un ligero aumento en la acidez volátil y niveles de levaduras viables demostrando así la validez de los avisos por parte de los sensores.

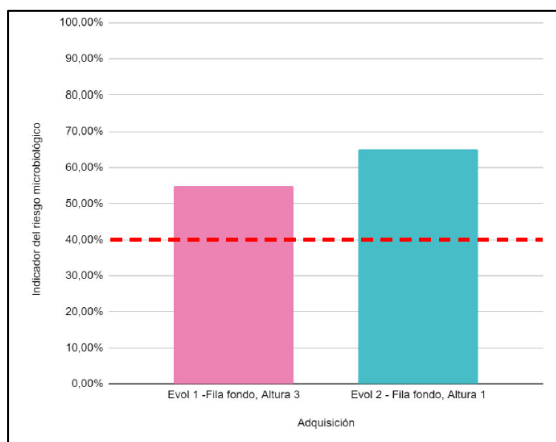


Figura 11: Indicador del riesgo microbiológico por adquisición en Bodega externa

La implementación de este sistema ha demostrado ser esencial para preservar la calidad del vino. A través de un monitoreo continuo y en tiempo real, se permite una detección temprana de riesgos asociados a microorganismos. Los sensores han proporcionado información crítica sobre parámetros ambientales, permitiendo a los enólogos tomar decisiones informadas y proactivas.

En conclusión, la integración de tecnología avanzada en la gestión de bodegas no solo protege la calidad del vino, sino que también optimiza la operativa de las instalaciones. El uso de sensores y algoritmos para el análisis de datos establece un marco robusto que permite a las bodegas anticiparse a problemas y actuar de manera efectiva, asegurando la excelencia del producto final.

## Conclusiones

La implementación de sensores en la monitorización continua de la fermentación alcohólica ha demostrado ser válida para optimizar la producción de vino y garantizar su calidad. A través de ensayos en VITEC y bodegas catalanas, se realizaron mediciones periódicas de densidad y temperatura. La alta correlación entre las mediciones manuales y automáticas valida la eficacia de estos sensores, permitiendo ajustes en tiempo real que son fundamentales para el éxito del proceso.

El uso de sensores inteligentes para el monitoreo del oxígeno disuelto y gaseoso puede proporcionar a los enólogos herramientas valiosas para gestionar el envejecimiento del vino, minimizando riesgos de oxidación y contaminación microbiológica. Los datos obtenidos han permitido identificar variaciones en las condiciones de crianza, facilitando la implementación de estrategias correctivas y mejorando la calidad del producto final.

La capacidad de los sensores para ofrecer información precisa y en tiempo real ha optimizado el control de los procesos enológicos, estableciendo un marco robusto para la toma de decisiones informadas. En resumen, la tecnología de sensores no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también asegura la excelencia del vino, constituyendo

una base sólida para futuras investigaciones en el ámbito de la enología.

## Bibliografía

1. ANGELKOV, D. et MARTINOVSKA, C. Sensor Module for Monitoring Wine Fermentation Process. (2017). Applied Physics, System Science and Computers. pp 253-262
2. CALVO-LÓPEZ, A. MARTÍNEZ-BASSEDAS, E. et al. Monitoring of total potassium in winemaking processes using a potentiometric analytical microsystem. (2021). Food Chemistry. Vol 345. DOI 10.1016/j.foodchem.2020.128779
3. CAÑETE, E. CHEN, J. et al. Smart Winery: A Real-Time Monitoring System for Structural Health and Ullage in Fino Style Wine Casks. (2018). MDPI. DOI 10.3390/s18030803
4. GÓMEZ-PLAZA, E. et BAUTISTA-ORTÍN, A. Chapter 10 - Emerging Technologies for Aging Wines: Use of Chips and Micro-Oxygenation. (2019). Red Wine Technology. pp 149-162. DOI 10.1016/B978-0-12-814399-5.00010-4
5. KOVAČEVIĆ, I., KESER, MILING, R. (2021). Winery Monitoring System: A Semi-automated Solutions for Product Quality Maintenance and Production Assistance. 30th International Conference on Organization and Technology of Maintenance (OTO 2021). pp 414–424. DOI 10.1007/978-3-030-92851-3\_31
6. LITTARRU, E. ALFIERI et al. Optimizing the winemaking process: NIR spectroscopy and e-nose analysis for the online monitoring of fermentation (2024). DOI 10.1002/jsfa.13336
7. PAMBUDI, S. et HUJJA, R. Ullage level monitoring model using sensors inside and outside the system in the fino-style winemaking aging process. (2021). IOP Conf. Ser.: Earth Environ. DOI 10.1088/1755-1315/686/1/012051
8. RANASINGHE, D. FALKNER, N. et al. Wireless sensing platform for remote monitoring and control of wine fermentation. (2013). IEEE Eighth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing. pp 503-508. DOI 10.1109/ISSNIP.2013.6529841
9. WANG, Q. LI, Z et al. Real time monitoring of multiple components in wine fermentation using an on-line auto-calibration Raman spectroscopy. (2014). Sensors and Actuators B: Chemical. DOI 10.1016/j.snb.2014.05.109