

MICROSISTEMAS PARA LA SEGURIDAD Y CALIDAD ALIMENTARIA

RESUMEN

La seguridad y calidad de los alimentos juega un importante papel en el nivel de vida de los ciudadanos. Por ello, la industria alimentaria está atenta a la búsqueda de nuevas soluciones que contribuyan a la mejora de la seguridad y calidad en las diferentes etapas de la cadena alimentaria. Hoy en día, la comunidad agroalimentaria confía en ensayos de laboratorio, muchas veces externos, de adecuada sensibilidad, bien aceptados y regulados. Sin embargo, esos ensayos suelen ser lentos y caros, no tan flexibles como sería de desear, y, por tanto, tienen lugar de forma estadística en un número limitado de muestras. Existe un interés en la búsqueda de soluciones alternativas basadas en nuevas tecnologías que permitan hacer más extensivos los controles de seguridad y calidad de los alimentos. Inmunosensores y chips de DNA para el control de contaminación química y biológica, sistemas multisensores portables para una adecuada logística y un mejor control de calidad pueden ser algunos de los beneficios de la introducción de las microtecnologías en este campo. La combinación de la microfabricación y de las nano y biotecnologías, acompañada de estrategias avanzadas de telecomunicación y de gestión de la información, debe dar lugar a una línea novedosa de instrumentación que, bien adaptada al campo agroalimentario, ha de traer consigo aspectos ventajosos con respecto a:

Miniaturización, que abrirá la posibilidad de una instrumentación portable y mínimamente invasiva adecuada a ensayos en línea o en campo.

Respuesta rápida, que permitirá una reducción de la duración de los ensayos, acercándonos al ideal de la monitorización de los alimentos en tiempo real.

Reducción de coste, de los propios dispositivos y del consumo de reactivos, que hará posible un despliegue más intensivo y extensivo de los ensayos a lo largo de la cadena alimentaria.

Lectura electrónica, habilitando la implementación de estrategias inteligentes de comunicación y la implantación de nodos locales de decisión que es la base de sistemas más autónomos.

En conclusión, los microsistemas pueden resultar muy adecuados para la monitorización de los alimentos dentro de esquemas mejorados de control, tipo HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point). Esto es así por la reducción del tiempo de los ensayos y de los reactivos necesarios y por sus capacidades telemáticas que permiten su despliegue e inclusión en bucles inteligentes de información, que resultan muy útiles en la trazabilidad y en la gestión de riesgos a lo largo de toda la cadena alimentaria. Además, los microsistemas, en combinación con sistemas inteligentes de toma de decisiones, pueden fácilmente ponerse al servicio de la optimización de la propia producción alimentaria.

NUEVOS TIEMPOS, NUEVOS RETOS. EL PROYECTO GOODFOOD.

Las crisis alimentarias de finales del siglo XX han obligado a un replanteamiento racional de la seguridad alimentaria a diferentes niveles. A nivel de políticas de gestión y de entes reguladores, este esfuerzo de sistematización se ha concentrado en definir lo que se conoce como *análisis de riesgos* (compuesto por esquemas interdependientes de *evaluación de riesgos*, *gestión de riesgos* y *comunicación de riesgos*). A nivel de productores y del propio tejido industrial agroalimentario esa sistematización se ha concentrado en los sistemas de control que han pasado del control del producto final a la adopción de buenas prácticas de producción (empezando por unas buenas prácticas agrarias) y a la adopción de esquemas orientados a la prevención, como el conocido como *Análisis de Peligros y Control de Puntos Críticos*. Todos esos replanteamientos tienen en común que se trata de esquemas de actuación basados en la información y, como tales, son susceptibles de beneficiarse de elementos que, a la hora de tomar decisiones o adquirir datos, permitan un acceso más próximo al alimento, más rápido y más frecuente (en el tiempo y en el espacio). También es importante que estos sistemas sean de bajo coste: a diferencia de otros sectores, como el cosmético, el farmacéutico o el microelectrónico, los márgenes en el campo agroalimentario son estrechos y la tasa de reinversión es baja y, además, es previsible que los consumidores no acepten de buen grado un sobrecoste para mejorar la seguridad de los productos ya que interpretan que ésta les ha de venir dada.

GoodFood: Seguridad y Calidad Alimentaria con Microsistemas es un Proyecto Integrado del 6º Programa Marco de la Comunidad Europea. Se

trata de una iniciativa que por su aproximación y campo de aplicación está a caballo de la Prioridad 2 (Tecnologías de la Sociedad de la Información) y de la Prioridad 5 (Seguridad y Calidad Alimentarias) de dicho programa marco aunque, de hecho, se ha gestado en la primera de ellas porque se ha puesto el énfasis en el desarrollo de microsistemas (diminutos y versátiles sistemas electrónicos que pueden aportar grandes ventajas en diferentes campos, entre ellos el control alimentario). GoodFood, por tanto, es una iniciativa de frontera y pluridisciplinar donde uno de los pilares de la Sociedad del Conocimiento, la biotecnología, se pone en contacto con las tecnologías propias de la Sociedad de la Información. Como tal, GoodFood, dio comienzo en enero de 2004 y finalizará a mediados de 2007, involucra a una treintena de grupos (universidades, centros tecnológicos y empresas) de diez países europeos y su coordinación se hace desde el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, lo que da muestra de la capacidad de integración de la ciencia y tecnología españolas en la investigación europea de primera línea.

Unos sistemas flexibles basados en la información no sólo han de ser útiles para hacer mejor lo que se hizo en el pasado sino también para afrontar con mayores garantías los retos emergentes que surgen de una nueva realidad socioeconómica que multiplica el riesgo alimentario. Vivimos en un mundo globalizado y es un hecho que los alimentos que tenemos a nuestra disposición hoy en día tienen un origen geográfico más diverso. Hay al respecto una demanda social: una mayor proporción de población inmigrante que reclama sus propios productos y, en general, se da una mayor sofisticación del consumidor que pide el disfrute no sólo de todo tipo de productos regionales sino de cualquier punto del planeta.

También una demanda económica e industrial: el sector agroalimentario recurre en mayor medida al *sourcing* de los diferentes ingredientes que forman parte de un producto elaborado. Ese origen más diverso del alimento conlleva una logística más compleja, en muchas ocasiones transfronteriza poniendo en contacto países con diferentes regulaciones, lo que, en última instancia, implica un mayor riesgo alimentario. Otro aspecto añadido es que, a consecuencia de la moderna organización social, concentramos nuestras compras en grandes superficies alejadas de los centros urbanos, con lo que la logística a pequeña escala también se resiente. Ese no es un hecho baladí: EEUU, que en este sentido presenta un mayor 'nomadismo', tiene una mayor incidencia de casos de intoxicación alimentaria, e Inglaterra, con una organización más parecida, está a la cabeza de Europa. Igualmente, las poblaciones humanas se están volviendo biológicamente más susceptibles a la acción de los patógenos. Los sistemas inmunológicos se debilitan en una población más envejecida, y una forma de vida más estresante y expuesta a agentes químicos de efectos a largo plazo, no siempre bien conocidos, sin olvidar una mayor proporción de grupos de población inmunológicamente deficitarios de forma sobrevenida como los transplantados, enfermos de SIDA, etc.

LAS TECNOLOGÍAS DE LO PEQUEÑO: MICROTECNOLOGÍAS Y MICROSISTEMAS

Lo que las Tecnologías de la Sociedad de la Información aportan al campo agroalimentario son las *tecnologías de lo pequeño* (las micro y nanotecnologías), el concepto de redes distribuidas y, por supuesto, las comunicaciones, que nos permiten conectar lo local con lo global (y la cadena alimentaria puede pensarse como un ejemplo de ello). Esas tecnologías de lo pequeño son las tecnologías de la miniaturización que han dado lugar a la revolución microelectrónica con microprocesadores y

memorias como grandes protagonistas y que permiten fabricar no sólo ordenadores, teléfonos móviles o videoconsolas, sino también dispositivos que ponen en contacto todo ese potencial de cálculo y tratamiento de datos con el medio que nos rodea a través de sensores y actuadores igualmente miniaturizados. Este tipo de dispositivos que llamamos microsistemas se están introduciendo satisfactoriamente en campos como el biomédico, el farmacéutico y el medioambiental, y pueden resultar igualmente habilitadores en el campo agroalimentario. Además, si este tipo de soluciones se demuestra suficientemente útil, barato y democrático (como han resultado todas las tecnologías de la información que se han implantado exitosamente en nuestra sociedad), los microsistemas podrán tener a más largo plazo un impacto positivo en uno de los eslabones más débiles de la cadena alimentaria (y menos reconocido como tal): el ámbito doméstico.

Como se decía, unos de los protagonistas de esas tecnologías de 'lo más pequeño' son los microsistemas. Estos son, como su nombre indica, sistemas miniaturizados, es decir, una reunión de elementos que interaccionan ordenadamente con el propósito de contribuir a una determinada función, y que presentan un tamaño milimétrico o submilimétrico con precisiones internas de milésimas de milímetro o inferiores. A semejanza de uno de los 'sistemas' más famosos, el sistema nervioso (un conjunto de órganos de los que unos reciben excitaciones, otros las transforman en impulsos nerviosos y otros conducen éstos a lugares del cuerpo en que han de ejercer una acción), la generalización más completa de un microsistema es la de un sistema miniaturizado que interacciona con su entorno y en el que puede distinguirse una parte que se ocupa del sensado de una determinada magnitud física (presión, aceleración, temperatura...) o bioquímica (reacción antígeno-anticuerpo, hibridación del DNA...) y de su trasducción a una magnitud internamente transmisible (normalmente un voltaje o una intensidad), tras cuyo procesado se genera una acción que llevará a cabo

SUMMARY

Food safety and quality assurance play an important role for the increase of the quality of life of all citizens. Thus, agrofood industry is quite concerned in finding out new test solutions for the different stages of the complete food chain. Nowadays agrofood industry relies mainly in tests performed with laboratory based systems, which are well accepted due to the good accuracy, but lack from flexibility and use to be time consuming and expensive. In this way, tests are usually performed randomly in different food samples, which means that tests are not universal. Thus, there is a real interest in looking for new solutions based on novel technologies that may help on the massive test of samples. Immunosensors, DNA chips, electrochemical devices, portable multisensing systems, optical and magneto based assays, etc., may be of high importance in the future if they benefit from the introduction of Micro technologies and systems. The combination of microfabrication, nano and bio technologies, computer sciences and advanced communication strategies will lead to a novel series of instrumentation fully adapted to the requirements of the agrofood field, as they will bring well appreciated advantages on:

Miniaturisation, that will allow new markets as portable instrumentation, and minimally invasive systems for field and at-line tests.

Fast response, that will allow reduction of time of the assays and thus on-line food screening applications.

Cost reduction of the sensing devices and of the reagents required, that will allow massive and extensive tests of the full agrofood chain.

Electronics reading, that will allow the implementation of smart communication strategies and local decision taking nodes which are the basis of autonomous systems.

New functionalities coming from the combination of sensor, actuator and electronics integration and data processing, that will allow new functionalities implemented with single devices.

In conclusion, Microsystems may be very adequate for food screening applications in HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point) schemes, because of a reduction of time for tests and of the reagents required, and because of the improvement of the capabilities of communication that enables setting an smart information loop useful for the decision taking and risk management at all stages of the food chain. Microsystems solutions may be also easily applied to the improvement of the food production when combined with smart decision taking systems.

Autores

L. Fonseca, C. Cané, E. Figueras, I. Gràcia, R. Rubio, A. Ruiz, N. Sabaté y J. Santander

Centro Nacional de Microelectrónica.
(CNM-IMB-CSIC) Campus UAB. E-08193
Bellaterra. SPAIN Tel +34 93 594 77 00.
e-mail: luis.fonseca@cnm.es

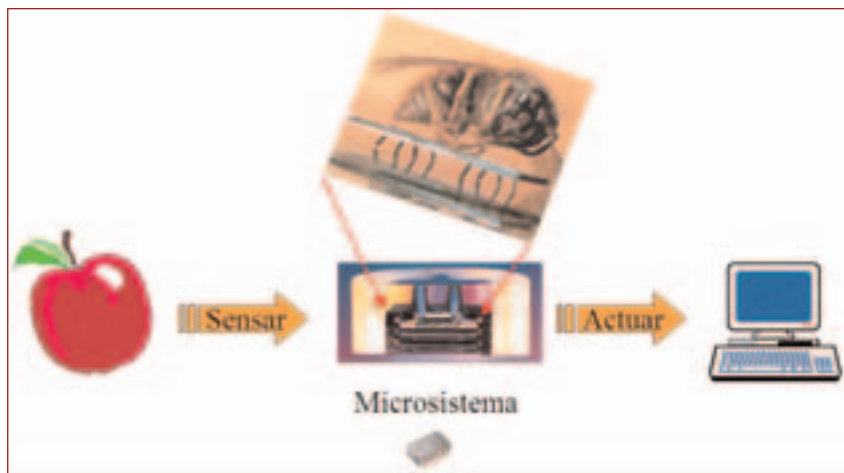


Fig. 1. Un microsistema es un dispositivo formado por elementos miniaturizados capaz de interactuar con su entorno siendo capaz de transformar magnitudes físicas o bioquímicas en señales eléctricas que pueden ser transmitidas y/o procesadas para poder generar una acción.

otra parte del sistema a través de una nueva trasducción. Es decir, en su forma más general un microsistema es un sensor y un actuador, ligados lógicamente y funcionalmente (Ver figura 1).

La gran ventaja de los microsistemas proviene de su reducido tamaño. Esa pequeñez facilita su cercanía al objeto de la medida y amplía su utilidad en aplicaciones *in situ*; reduce su consumo, siempre energéticamente interesante; aumenta la fiabilidad y la rapidez de su comunicación al estar todos los componentes más próximos;

incrementa la rapidez de respuesta debido a una menor inercia (en aplicaciones mecánicas o térmicas, por ejemplo) y puede aumentar su sensibilidad y resolución (elementos sensores más pequeños son capaces de advertir cambios más tenues y más localizados). Hasta la fecha, ha resultado habitual que los microsistemas tomen cuerpo usando el silicio como material. Esto es así porque los microsistemas nacieron de la mano de la microelectrónica, una tecnología donde la miniaturización es consus-

tancial, y hablar de microelectrónica es hablar de silicio. De esta forma, el silicio como material está avalado por una tecnología madura, de alto rendimiento y alta fiabilidad, que permite la fabricación por lotes y la economía de escala y abre la posibilidad de que los microsistemas sean de gran consumo y bajo precio (Ver figura 2).

Además, el silicio soporta una tecnología de *micromecanización* que permite darle 'grados de libertad' y fabricar las estructuras móviles necesarias para interactuar con el medio. Igualmente, puede ser manipulado para que cuando forme parte de sensores o actuadores tenga una trasducción lo bastante versátil. Por último, siendo el silicio el material microelectrónico por excelencia, si el microsistema está igualmente fabricado con él, o basándose en él, podemos aprovechar todo el potencial de la integración electrónica y darle inteligencia. No es inusual que el corazón de un microsistema sea un 'chip' o dado de silicio donde se han fabricado millones de transistores con gran capacidad de procesamiento y transmisión de los datos adquiridos del entorno.

Sin embargo, es igualmente cierto que cada vez se recurre al concurso de otros materiales distintos. Esto es

Tabla I.

Objetivos prioritarios de detección o análisis en los distintos supuestos contemplados en el proyecto GoodFood.

Objetivo genérico	Producto	Objetivos prioritarios
Antibióticos	Leche y derivados	Betalactámicos, cloranfenicoles, tetraciclinas y sulfonamidas
Pesticidas	Fruta y derivados	2,4,6-Triclorofenol, Simazina, Atrazina y Clozolinato
Micotoxinas	Fruta y derivados	Aflatoxina, Ocratoxina, Patulina
Hongos toxigénicos	Fruta	Aspergillus, Penicillium expansus
Patógenos	Leche y derivados	Listeria y Salmonela
Calidad	Pescado / Vino	Compuestos Orgánicos Volátiles TMA, DMA, TVB-N, NH ₃
Logística	Fruta climatérica	Etileno, NH ₃
Ambiente Inteligente	Uvas y vino	Parámetros ambientales y de desarrollo de la vid Parámetros del vino en barricas y botellas

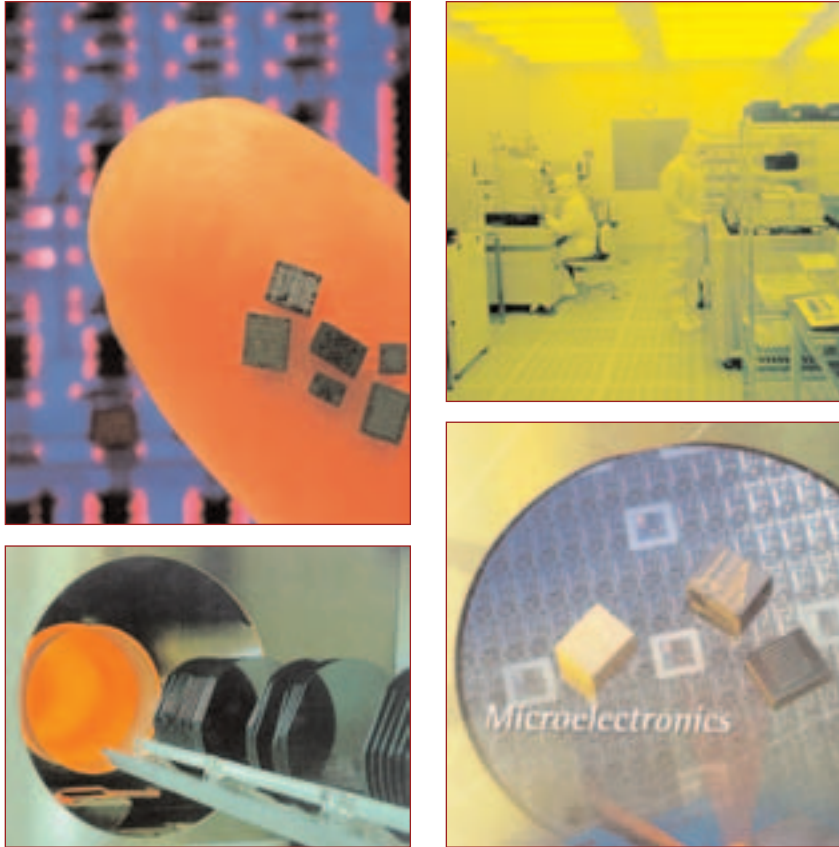


Fig. 2. Las microtecnologías permiten la fabricación de numerosos de dispositivos de muy pequeñas dimensiones en cada sustrato y procesan numerosos sustratos simultáneamente en un entorno tecnológico controlado que permite un buen rendimiento, lo que redundará en un bajo coste por dispositivo.

así porque, a pesar de sus contrastadas propiedades, el silicio y materiales afines no son una familia de aplicación universal y presentan limitaciones como sensores químicos, materiales biológicos o elementos ópticos, por ejemplo. Por razones de coste, también se investigan otros materiales (generalmente plásticos) para aquellas partes de los microsistemas que, por estar en contacto con muestras biológicas, se conciben como desechables para evitar contaminaciones cruzadas.

EL PAPEL DE LOS MICROSISTEMAS EN EL CAMPO AGROALIMENTARIO

En la actualidad, el análisis de los alimentos ha de realizarse en laboratorios especializados mediante técni-

cas elaboradas que toman su tiempo y tienen un coste elevado (Ver figura 3). Por este motivo, estos análisis son de naturaleza puntual y sólo suelen tener lugar cuando los alimentos cambian de mano a lo largo de la cadena alimentaria: del productor al transformador en forma de materia prima, y del transformador al comerciante en forma de producto acabado. Entre el comerciante y el usuario final no suele mediar ningún control activo adicional: la calidad queda a expensas del respeto de las fechas de consumo recomendado y de la preservación de la cadena de frío cuando es precisa.

Mediante el desarrollo de sistemas de detección de pequeño tamaño, bajo coste, bajo consumo energético, fácil manejo y respuesta rápida, con conexión directa con nodos autónomos de decisión, será posible la utilización masiva de sistemas de control en las diferentes etapas de la cadena alimentaria desde la materia prima hasta el producto final. El análisis se

hará más cercano al alimento, podrá tener lugar más a menudo y en más puntos de la cadena de producción y no requerirá de personal especializado (técnicos de laboratorio, catadores). Además, a más largo plazo puede habilitar al consumidor como un actor más en el control de la calidad de los alimentos que consume (ver figura 4). De alguna forma, el lema que resume el objetivo final del proyecto es *'llevar el laboratorio al alimento... y del campo hasta la mesa'*.

Conviene hacer una precisión oportuna con respecto al tamaño de estos equipos o dispositivos. Es cierto que algunos de sus elementos, como los sensores, pueden ser milimétricos pero, dependiendo de la complejidad de la aplicación, el tamaño del equipo en su conjunto será el de una caja de cerillas, el de un móvil, el de una lata de refresco o el de una caja de zapatos. Hay que recalcar que, en ningún caso, estos dispositivos se 'implantan' en los alimentos. O bien se trabaja con muestras de los mismos (como hasta ahora, pero más cerca del origen del problema), o bien se analizan sus emanaciones para lo cual no hace falta contacto. Los microsistemas interactúan en todo momento de forma inocua con los alimentos y su misión es arroparlos a lo largo de la cadena alimenticia, redundando en beneficio de la seguridad de todos. Ese seguimiento de los alimentos a lo largo de la cadena con sistemas íntimamente ligados a las tecnologías de la información da respuesta de forma natural a los requerimientos de trazabilidad de los productos alimenticios y alimentarios.

Los microsistemas no sólo pueden jugar un papel de control en la calidad y seguridad alimentaria sino que también pueden contribuir a un incremento de la productividad. Hay muchos ámbitos de la industria agroalimentaria donde es preciso un control de parámetros físicos, químicos y biológicos eficiente en tiempo y dinero. Estamos hablando de procesos de transformación, de procesos de almacenaje controlado (fruta climatérica), de almacenaje activo (secado de jamones, curado de quesos, envejecimiento del vino), de asegurar la calidad del producto durante el transporte, etc.



Fig. 3. Las soluciones basadas en microsistemas suponen una alternativa a los sofisticados equipos de laboratorios centralizados, no requieren personal especializado y permiten ensayos no invasivos en los alimentos.

EL ÁMBITO DE ACTUACIÓN DE GOODFOOD

Contemplar todo tipo de alimentos está, lógicamente, fuera del alcance del proyecto y centrarse en un único producto sería demasiado restrictivo. En la práctica el proyecto GoodFood se restringe a un número limitado,

pero representativo, de productos alimenticios y alimentarios: *leche y derivados, frutas, zumos de frutas y vino, así como pescado*. En el apartado de la seguridad alimentaria, se detectarán antibióticos y patógenos en la leche (y derivados), pesticidas, hongos y micotoxinas en la fruta (y derivados). En el ámbito de la calidad, los alimentos escogidos son los que dan lugar a los escenarios más exigentes: la fruta climatérica, debido a su pro-

longado almacenamiento en cámaras, y el pescado, dada su condición de elemento perecedero. En este caso, el objeto de la detección son aquellas emisiones propias de los alimentos que dan idea de su estado de conservación, así como las condiciones físicas ambientales que, en ese sentido, son determinantes.

De esta manera, los escenarios de medida comprenden la detección de sustancias químicas tanto artificiales (antibióticos, pesticidas) como naturales (micotoxinas), organismos vivos como hongos y bacterias, y se afrontan diferentes casuísticas de vida media del producto en el control de su conservación. Los casos considerados proporcionan una variedad de supuestos (sólidos/líquidos, materias primas/derivados, productos perecederos/climatéricos) suficiente para esperar que, tras la validación de este tipo de tecnología en los casos elegidos, su utilidad sea trasladable a otros muchos casos interesantes.

En el caso de la detección de residuos, tanto químicos como biológicos, el objetivo es desarrollar sistemas multianálisis portables para medida en línea que permitan un *screening* rápido de los alimentos. En el caso de los residuos químicos, estos dispositivos son *inmunosensores* que basan su funcionamiento en la especificidad de la reacción entre un antígeno (el residuo a detectar) y el oportuno anticuerpo (existente comercialmente o a desarrollar por el equipo del proyecto). En el caso de organismos patógenos, la detección pasa por la identificación del correspondiente material genético con la ayuda de *chips de DNA* que, debido a su tamaño permiten muchos puntos de hibridación facilitando la detección simultánea de varias especies o de varias cepas de la misma especie y con un grado de redundancia adecuado. En este tipo de desarrollos es donde más evidente se hace la necesaria pluridisciplinariedad del proyecto pues en ellos deben colaborar los grupos que diseñan y fabrican las diferentes plataformas sensoras en las que las reacciones químico-biológicas deben verificarse y los grupos de biología molecular que deben garantizar la compatibilidad de los reactivos con dichas plataformas y agilizar los proce-



Fig. 4. El pequeño tamaño de los microistemas, su portabilidad, mayor autonomía y rapidez de respuesta los hace útiles a lo largo de toda la cadena alimentaria.

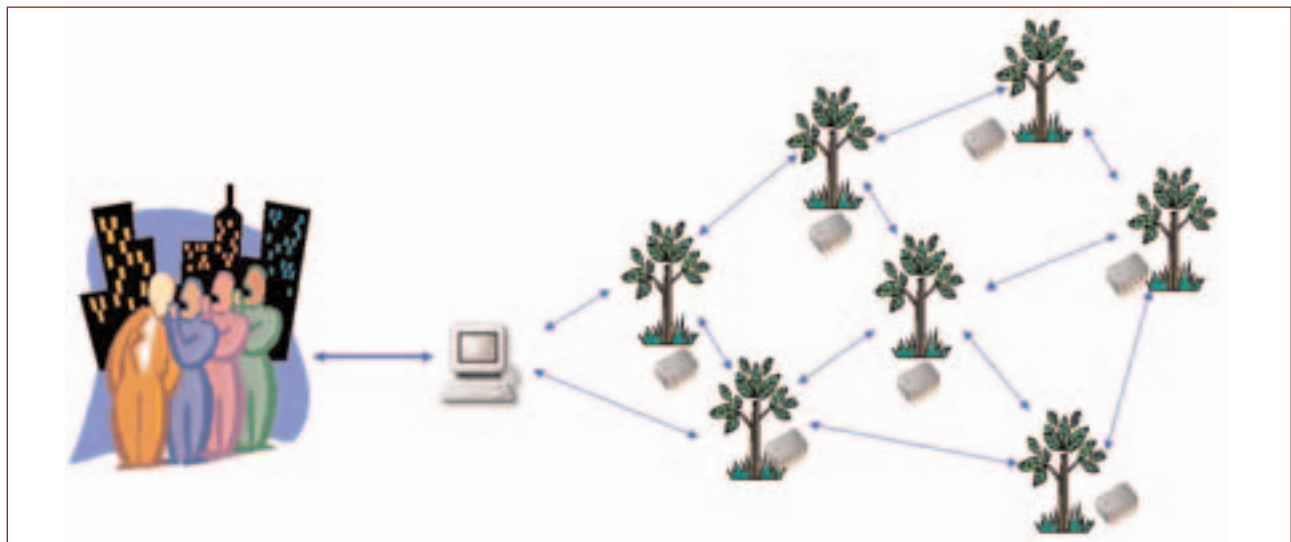


Fig. 5. Las características ventajosas de los microistemas (tamaño, coste, autonomía...) permiten contemplar situaciones en las que la garantía la seguridad y calidad alimentaria precise, no ya un elemento sensor, sino el despliegue inalámbrico de varios de ellos.

dimientos de preparación de muestras y enriquecimiento de material genético para reducir el principal cuello de botella de estos diagnósticos.

En el caso de la determinación del estado de conservación de productos, como fruta o pescado, el objetivo es el desarrollo de sistemas multisensores miniaturizados capaces de discriminar varios gases o compuestos relacionados con dicha conservación. Estamos hablando de sensores de gases miniaturizados y de microelectrodos en combinación con microcromatógrafos de gases y líquidos. En el campo de la

logística también se contempla el desarrollo de una etiqueta inteligente de identificación por radiofrecuencia (RFID) con sensores integrados.

Por último, y de forma transversal, se trabaja en el desarrollo de plataformas inteligentes para la interconexión remota de diferentes nodos sensores, útiles en aquellos casos en los que el garantizar la seguridad y calidad alimentaria precise no ya un elemento sensor, sino el despliegue inalámbrico de varios de ellos. Ese concepto de "Ambiente Inteligente" está siendo aplicado, a modo de ejemplo, para la

mejora de la producción en una viña y bodega pilotos que se utilizarán como demostradores de la utilidad potencial de estas plataformas en la agricultura de precisión o en otros desarrollos del campo agroalimentario (ver figura 5).

En la Tabla I se concretan, de forma resumida, las sustancias o parámetros que constituyen los objetivos de detección y/o análisis en los diferentes ámbitos de actuación contemplados en el proyecto GoodFood. Más información relacionada con este proyecto puede encontrarse en www.goodfood-project.org. 