



UPC

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

DEPARTAMENT DE TEORIA DEL SENYAL I COMUNICACIONS

**Diseño de una nariz electrónica
para la determinación no
destruktiva del grado de
maduración de la fruta**

AUTOR:

JESUS BREZMES LLECHA

DIRECTOR:

XAVIER CORREIG BLANCHAR

A mi mujer e hija

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi familia todo el apoyo recibido durante mi etapa académica, en especial a mis padres y hermano. Sin su ánimo y cariño jamás habría finalizado mi carrera universitaria y por lo tanto no estaría en condiciones de defender mi tesis doctoral.

El Dr. Xavier Correig, director de esta tesis, siempre me ha apoyado tanto a nivel profesional como personal durante la realización de este trabajo. Lejos de ser una relación director-alumno, he encontrado en sus consejos y comprensión a un buen amigo y compañero de trabajo. Gracias, por lo tanto, por esa amistad y relación profesional sin la que estoy seguro que este trabajo no hubiese llegado a buen término.

A Eduard Llobet y Xavier Vilanova, compañeros de mi mismo grupo de investigación, les tengo que agradecer todo su paciencia y apoyo durante los años que ha durado este trabajo, además de las sugerencias realizadas a los artículos y memoria que conforman esta tesis doctoral. Al resto de compañeros del DEEEA, a los que no nombro por miedo a dejarme a alguien, debo agradecerles su amistad y compañerismo que han hecho de mi vida profesional una experiencia muy positiva.

Otro de los efectos positivos de esta tesis ha sido conocer y trabajar con mis compañeras de la Universidad de Lleida. Querría recalcar, además de su profesionalidad y dedicación, su disponibilidad a ayudarme en cualquier duda que me surgiera en todos los aspectos relacionados con el estudio de la fruta, conocimientos algo lejanos a mi formación como ingeniero de telecomunicación. Gracias por la ayuda incondicional que me habeis prestado todos estos años.

A Gabriel Junyent, mi tutor en TSC, quiero agradecerle su apoyo, paciencia y disponibilidad. También me gustaría destacar la confianza inicial y financiación aportada por la empresa “Catalunya Qualitat”. Para finalizar, quiero agradecer la colaboración de Marcos Yague, Beni Vazquez, Elisenda Roca y de todos aquellos que, de alguna manera u otra, me han ayudado a que esta tesis se hiciera realidad.

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del proyecto CICYT-FEDER No. 2FD-97-0436 (TIC) con financiación adicional aportada por la empresa “Catalunya Qualitat”

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
REFERENCIAS.....	10
2. TÉCNICAS DE CONTROL DE CALIDAD EN FRUTA.....	13
2.1 INTRODUCCIÓN	13
2.2 MEDIDAS FÍSICO-QUÍMICAS.....	15
2.2.1 Firmeza.....	16
2.2.2 Análisis de Sólidos Solubles.....	17
2.2.3 Análisis de Acidez.....	19
2.2.4 Colorimetría.....	20
2.2.5 Índice de almidón.....	21
2.3 MEDICIÓN DE VOLÁTILES	23
2.3.1 Medidas aromáticas.....	23
2.3.2 Producción de etileno	26
2.4 TÉCNICAS EXPERIMENTALES.....	27
2.4.1 Mediciones con ultrasonidos	28
2.4.2 Espectrometría de infrarojo cercano.....	29
REFERENCIAS.....	31
3. DISEÑO DE SISTEMAS DE OLFATO ELECTRÓNICO	35
3.1 INTRODUCCIÓN	35
3.2 PROTOTIPO DE INYECCIÓN	37
3.2.1 Descripción general.....	37
3.2.2 Sistema de muestreo.....	39
3.2.2.1 Cámara de concentración	39
3.2.2.2 Cámara de medida	39
3.2.2.3 Jeringa cromatográfica	40
3.2.3 Matriz de sensores	41
3.2.3.1 Los sensores de gases	41
3.2.3.2 Sensores Figaro	43
3.2.4 Circuitos de polarización y medida	47
3.2.5 Sistema de adquisición y procesado	49
3.3 PROTOTIPO DE FLUJO CONTINUO.....	50
3.3.1 Descripción general.....	50
3.3.2 Sistema de muestreo.....	52
3.3.2.1 Cámara de concentración	52
3.3.2.2 Cámaras de medida.....	53
3.3.3 Matrices de sensores.....	55
3.3.3.1 Sensores FIS serie SP	58
3.3.3.2 Sensores FIS serie SB.....	60
3.3.4 Circuitos de polarización y medida	62
3.3.5 Sistema de adquisición y procesado	65
REFERENCIAS.....	67

4. PROCESADO DE SEÑAL.....	69
4.1 INTRODUCCIÓN	69
4.2 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA)	73
4.2.1 <i>Introducción</i>	73
4.2.2 <i>Algoritmo</i>	74
4.2.3 <i>Implementación</i>	77
4.2.3.1 <i>Programación</i>	77
4.2.3.2 <i>Mejoras del algoritmo</i>	78
4.2.3.3 <i>Evaluación de resultados</i>	79
4.2.4 <i>Otras aplicaciones</i>	80
4.3 PARTIAL LEAST SQUARES	82
4.3.1 <i>Introducción</i>	82
4.3.2 <i>Algoritmo</i>	83
4.3.3 <i>Implementación</i>	84
4.3.3.1 <i>Programación</i>	84
4.3.3.2 <i>Aplicación del método a las medidas de fruta</i>	85
4.3.3.3 <i>Evaluación de resultados</i>	86
4.4 REDES NEURONALES FEEDFORWARD.....	87
4.4.1 <i>Introducción</i>	87
4.4.2 <i>Algoritmo</i>	88
4.4.2.1 <i>Estructura</i>	88
4.4.2.2 <i>Aprendizaje</i>	90
4.4.3 <i>Implementación</i>	91
4.4.3.1 <i>Programación</i>	91
4.4.3.2 <i>Aplicación a las medidas con fruta</i>	92
4.4.3.3 <i>Evaluación de resultados</i>	92
4.5 REDES FUZZY ART	93
4.5.1 <i>Introducción</i>	93
4.5.2 <i>Algoritmo</i>	95
4.5.3 <i>Implementación</i>	96
4.5.3.1 <i>Programación</i>	96
4.5.3.2 <i>Evaluación de resultados</i>	97
4.6 RED FUZZY ARTMAP	98
4.6.1 <i>Introducción</i>	98
4.6.2 <i>Algoritmo</i>	100
4.6.3 <i>Implementación</i>	102
4.6.3.1 <i>Programación</i>	102
4.7 PREPROCESADO	104
4.7.1 <i>Introducción</i>	104
4.7.2 <i>Extracción de parámetros</i>	104
4.7.3 <i>Normalización de los datos</i>	107
4.7.4 <i>Selección de variables</i>	110
4.7.4.1 <i>Criterio de sensibilidad</i>	111
4.7.4.2 <i>Por covarianza entre variables</i>	112
4.7.4.3 <i>Algoritmos genéticos</i>	114
REFERENCIAS.....	117
5. MEDIDAS CON MANZANAS.....	121
5.1 INTRODUCCIÓN	121
5.2 ESTUDIO DE VIABILIDAD.....	122
5.2.1 <i>Objetivos</i>	122

5.2.2 Metodología experimental	123
5.2.3 Evolución de la señal	125
5.2.4 Resultados	126
5.2.5 Conclusiones	131
5.3 MEDIDAS EN FLUJO CONTINUO	132
5.3.1 Objetivos	132
5.3.2 Metodología experimental	133
5.3.3 Seguimiento del proceso de maduración	134
5.3.4 Correlación entre parámetros destructivos y señales de los sensores del prototipo	137
5.3.5 Estudio de las derivas de los sensores	139
5.3.6 Conclusiones	145
REFERENCIAS	146
6. MEDIDAS CON PERAS	147
6.1 INTRODUCCIÓN	147
6.2 ESTUDIO DE VIABILIDAD	148
6.2.1 Objetivos	148
6.2.2 Metodología experimental	148
6.2.3 Evolución de la señal	150
6.2.4 Resultados	150
6.2.5 Conclusiones	154
6.3 MEDIDAS EN FLUJO CONTINUO	154
6.3.1 Objetivos	154
6.3.2 Metodología experimental	155
6.3.3 Clasificación no supervisada	156
6.3.4 Correlación entre indicadores de calidad y señales de la matriz de sensores	161
6.3.5 Conclusiones	164
REFERENCIAS	166
7. MEDIDAS CON MELOCOTONES Y NECTARINAS	167
7.1 INTRODUCCIÓN	167
7.2 ESTUDIO DE VIABILIDAD	167
7.2.1 Objetivos	167
7.2.2 Metodología experimental	168
7.2.3 Evolución de la señal	169
7.2.4 Resultados	172
7.2.5 Conclusiones	177
7.3 MEDIDAS EN FLUJO CONTINUO	178
7.3.1 Objetivos	178
7.3.2 Metodología experimental	178
7.3.3 Clasificación no supervisada	180
7.3.4 Correlación entre indicadores de calidad y señales de la matriz de sensores	183
7.3.5 Conclusiones	189
REFERENCIAS	190
8. CONCLUSIONES	191

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

Estos últimos años hemos asistido a una profunda reestructuración en la industria alimentaria. Durante la mayor parte del siglo XX los esfuerzos en investigación y desarrollo fueron encaminados a optimizar la producción desde un punto de vista cuantitativo. Actualmente, la existencia de excedentes de producción y la excesiva competencia ha propiciado un cambio de mentalidad en el que se prima la calidad por encima de la cantidad. Por ese motivo, el control de calidad de los alimentos está adquiriendo una importancia capital. Además, se trata de una actividad que, lejos de ser puntual, se integra cada vez más en todo el proceso productivo, abarcando desde el inicio de la producción hasta la distribución del producto final en los mercados de consumo.

Este cambio de mentalidad, si bien es general en toda actividad relacionada con la alimentación, es crítico en las producciones frutícolas. La competencia de países con mano de obra barata es muy fuerte y los costes de producción en los países desarrollados no paran de crecer. Como consecuencia, el precio final en los mercados es elevado y la viabilidad (venta) del producto solo se justifica si va acompañado de una garantía de calidad.

En este sentido, el proceso de comercialización de la variedad “pinklady” de manzana [1.1] (una de las variedades estudiadas en este trabajo) es un buen ejemplo de la forma de entender la agricultura que a buen seguro imperará en el siglo XXI. Su precio de mercado es muy superior al que se paga por otras variedades, ofreciendo a cambio una inmejorable calidad cuidadosamente estandarizada que solo se ha conseguido a base de

monitorizar y normalizar el proceso de producción, controlando desde la plantación del manzano hasta la recolección en la fecha considerada óptima para cada campaña.

En el caso de la fruta, la calidad del producto final depende de muchos factores, algunos ambientales (y por lo tanto poco controlables) y otros directamente relacionados con la gestión del producto (fecha de recolección, tiempo y tipo de conservación en cámara, etc). De todas maneras, desde el punto de vista del consumidor, el grado de maduración es el factor que más se relaciona con la calidad de la fruta [1.2]. Por este motivo la determinación de la fecha de recolección es crucial para que la fruta llegue al consumidor en su estado óptimo de maduración. Para dar respuesta a esta necesidad, diferentes métodos para determinar el estado de maduración han sido propuestos [1.3]. De ellos, destacamos los siguientes:

- **Penetromía:** Método mecánico de medición de la consistencia de la pulpa. Es una técnica rápida, barata y sencilla, aunque inevitablemente significa la destrucción de la muestra. Su relación con la maduración es más clara en algunas variedades de fruta que en otras.
- **Reflectometría:** Método que consiste en analizar el grado de glucosa de la pulpa. Esta técnica presenta las mismas ventajas e inconvenientes que la anterior. De todas maneras, su relación con la madurez de la fruta es menos clara que en el caso de la penetromía.
- **Cromatografía (líquida o gaseosa):** Es un método de análisis muy exacto pero que presenta un conjunto de inconvenientes en su aplicación práctica. La preparación previa de las muestras a analizar, la complejidad de uso de los cromatógrafos y de interpretación de los resultados, el elevado coste del equipo y la no obtención de resultados en tiempo real hacen que esta técnica sea poco utilizada. De todas formas, es adecuada en estudios de investigación sobre valoraciones de calidad ante diferentes formas de procesar la fruta. De hecho, se puede afirmar que en la actualidad, para trabajos científicos, el estudio de producción aromática como indicador de calidad es un campo de investigación muy activo [1.4,5].
- **Colorimetría:** Técnica en la que la maduración de la fruta se asocia a cambios en su coloración. El análisis objetivo mediante el color requiere la utilización de

equipos que incluyen sensores ópticos bastante complejos, con un coste bastante elevado [1.6,7].

- Impedancia acústica: Se basa en la medida de la impedancia acústica de la fruta que se quiere analizar. Algunos autores han demostrado cómo la absorción de ultrasonidos varía de forma característica con el grado de maduración. El principal problema de este método consiste en su escasa aplicabilidad en la industria ya que es difícil conseguir un buen acoplo acústico entre la fuente de ultrasonidos y la fruta analizada sin estropearla. En ambientes de laboratorio se ha ensayado la utilización de tanques de inmersión con resultados desiguales [1.8,9].
- La espectrometría de infrarrojo cercano es una técnica que caracteriza la reflectancia de la fruta ante diferentes longitudes de onda. Este espectro varía a lo largo del proceso de maduración y puede ser utilizado para predecir algunos indicadores de calidad, aunque no siempre tiene suficiente resolución como para seguir el proceso de maduración [1.10]. Además, requiere de un equipo costoso que debe ser calibrado frecuentemente con un láser.

Como se puede deducir de estas breves descripciones, cada uno de estos métodos presenta algún inconveniente que dificulta su aplicación práctica. De hecho, ninguna de las técnicas anteriores puede considerarse un método de medición que caracterice completamente el grado de maduración de la fruta, por lo que la búsqueda de nuevos indicadores que midan de forma fiable la calidad del producto de acuerdo con el punto de vista del consumidor final sigue siendo una actividad de gran interés en la industria frutícola.

A pesar de su importancia, debido a las dificultades que presentan las técnicas actuales, la determinación del momento óptimo de recolección suele dejarse en manos de operarios cuya decisión está basada en la experiencia práctica o en criterios de distribución. Esta inexactitud es la causa de que cantidades importantes de fruta lleguen al consumidor con una calidad inferior a la esperada dado su inadecuado estado de maduración. Y lo que es más importante, fruta de la misma variedad cosechada en la

misma zona llega al consumidor con niveles de calidad muy dispares, lo que dificulta asociar una determinada variedad de fruta a una calidad definida que permita consolidar su valor de mercado.

En definitiva, la industria frutícola busca todavía una técnica que le permita, de forma práctica, rápida, barata y fiable, determinar el grado de maduración de la fruta y poder así servir un producto de la mejor calidad posible al consumidor. En esta búsqueda es donde una nariz electrónica podría dar respuesta a la mayoría de necesidades que presenta su comercialización.

Los sistemas de olfato electrónico, popularmente conocidos como “narices electrónicas”, tienen una historia muy reciente. Aunque sus orígenes se remontan a los primitivos sistemas montados en los sesenta [1.11], el término “nariz electrónica” y los primeros sistemas inteligentes de olfato electrónico no aparecieron hasta la segunda mitad de la década de los ochenta. Se puede afirmar, de todas maneras, que el interés por este tipo de sistemas y la investigación en olfato electrónico dio un salto espectacular en la primera mitad de los noventa. Es en esta etapa en la que se acuña la definición comúnmente aceptada hoy en día de sistema de olfato electrónico: “instrumento que comprende una matriz de sensores químicos con sensibilidades parcialmente solapadas y algoritmos inteligentes capaces de reconocer aromas simples o complejos” [1.12].

Las narices electrónicas han encontrado en la industria alimenticia uno de sus campos naturales de actuación. Numerosos estudios pusieron de manifiesto su utilidad en aplicaciones tan diversas como la clasificación de diferentes tipos de licores [1.13], cafés [1.14], cosechas de vino [1.15], etc. De todas maneras, las aplicaciones comerciales con más futuro son aquellas en las que se utiliza el sistema de olfato electrónico para monitorizar el estado de diferentes productos alimenticios, bien sea durante su producción o durante su conservación [1.16-18].

Es precisamente en el campo de la fruticultura en el que los sistemas de olfato electrónico podrían convertirse en un instrumento ideal para monitorizar de forma no destructiva el estado de la fruta ya que una de las características propias del proceso de

maduración es la emisión de compuestos volátiles orgánicos. Así, por ejemplo, el periodo en el cual la fruta climatérica madura coincide con un incremento de etileno que se difunde desde el interior del fruto hacia el exterior. Una vez la fruta ha llegado a su máximo grado de maduración, se produce un decaimiento en las emisiones del mismo. Este compuesto viene acompañado de multitud de compuestos volátiles aromáticos (más de 50 en algunas variedades), los cuales presentan cambios muy significativos durante el proceso de maduración de la fruta [1.19-20]. Podemos decir, por lo tanto, que la consecución de un equipo capaz de analizar dichos volátiles en tiempo real podría ser muy útil para la monitorización del proceso de maduración.

A priori, un sistema de olfato electrónico podría aportar importantes ventajas respecto a técnicas más convencionales como la cromatografía. Entre las ventajas que podría aportar un instrumento de estas características se pueden destacar las siguientes:

- Análisis no destructivo
- Obtención de resultados en tiempo real (en cuestión de minutos)
- Portabilidad, robustez y bajo precio del equipo
- Adaptación a diferentes cantidades y variedades de fruta
- Facilidad de uso del equipo por parte de personal no cualificado

Dentro de las diferentes tareas relacionadas con la producción de fruta, un sistema de olfato electrónico podría integrarse en las siguientes actividades:

- Determinación de fecha óptima de recolecta: Tanto si la fruta se destina al consumo directo como si se destina a cámaras de conservación siempre existe un grado óptimo dentro del proceso de maduración en el que debe recolectarse para que llegue con la mayor calidad posible al consumidor final.
- Control de calidad: La emisión de componentes aromáticos por parte de la fruta está directamente relacionada con sus características organolépticas [1.21]. Una rápida inspección de la emisión de volátiles del género que entra en un centro de almacenamiento o distribución permitiría valorar la calidad de la fruta que

suministra el productor, premiando aquellas partidas con mayor “densidad” aromática.

- Control en cámaras: En toda fruta climatérica el etileno es una sustancia íntimamente relacionada con el proceso de maduración. Es tanto un indicador de que el proceso de maduración está avanzando, como una sustancia que puede activar dicho proceso. La excesiva concentración de etileno en una cámara puede ser indicativo de un estado de maduración avanzado que aconseje distribuir inmediatamente el producto para evitar su pérdida. Además, su aparición puede iniciar una reacción en cadena, ya que su presencia acelera la maduración y ésta, a su vez, produce etileno en grandes cantidades.
- Determinación del estado de maduración en el supermercado: Un usuario podría seleccionar la fruta que compra comprobando su perfil aromático para asegurar su calidad y estado de maduración.

Dado el gran abanico de posibilidades que ofrece esta tecnología en el mundo frutícola no es de extrañar que ya se hayan presentado algunos trabajos que exploran estas posibilidades. De ellos, el de Benady [1.22] puede considerarse como uno de los pioneros. Durante la realización de esta tesis doctoral, otros trabajos se han adentrado en este tipo de aplicaciones [1.23-24], aunque ninguno es lo suficientemente completo como para evaluar objetivamente la posibilidad de utilizar narices electrónicas en el campo de la fruta.

Esta tesis doctoral pretende evaluar esta posibilidad con el estudio más amplio realizado hasta la fecha sobre la utilización de una nariz electrónica para determinar el estado de maduración de fruta climatérica. Tras realizar unos primeros estudios de viabilidad, construyendo un prototipo de laboratorio inicial que será probado en diferentes variedades de fruta, se pasará a realizar un estudio mucho más exhaustivo utilizando un segundo equipo diseñado con la experiencia de los primeros resultados. Para poder evaluar objetivamente la posibilidad de utilizar un equipo de olfato electrónico para el control de calidad de la fruta se compararán los resultados obtenidos con el prototipo

con los que se obtienen con técnicas tradicionales de control de calidad. En definitiva, los objetivos principales de este trabajo pueden ser resumidos en tres puntos:

- Construir y perfeccionar un prototipo de laboratorio para evaluar la viabilidad de utilizar un equipo de olfato electrónico como instrumento de determinación del grado de maduración de la fruta de forma no destructiva.
- Buscar si existe una buena correlación entre la señal de la nariz electrónica y la maduración de la fruta, comparando los indicadores de calidad de fruta con las señales de la matriz de sensores del prototipo.
- Realizar un estudio con variedades climatéricas de fruta. En concreto, manzanas, peras, melocotones y nectarinas, todas ellas variedades climatéricas, fueron las variedades escogidas debido a su interés comercial en la zona próxima a los laboratorios en los que se ha realizado el estudio.

La implementación de sistemas de olfato electrónico para una aplicación particular requiere adaptar cada uno de los módulos que componen una nariz electrónica genérica a dicha tarea. De todos ellos, uno de los más importantes es el módulo que procesa la señal que proviene de la matriz de sensores. La misma definición de sistema de olfato electrónico deja patente su importancia y es una de las piezas angulares de este proyecto.

Aunque existen multitud de algoritmos de reconocimiento de patrones, muchas veces es necesario adaptarlos a las características de los sistemas de olfato electrónico en general y de sus aplicaciones en particular. Esta necesidad es la razón de que el procesado de señal en sistemas de olfato electrónico sea objeto de muchos trabajos de investigación [1.25] y es de opinión general que queda un largo camino por recorrer hasta que se perfeccionen algoritmos que puedan explotar al máximo la información suministrada por la matriz de sensores y eliminar interferencias como la humedad, temperatura y derivas temporales, inconvenientes presentes en la mayoría de sensores utilizados en los sistemas de olfato electrónico actuales.

En este proyecto ha sido necesario utilizar algoritmos para clasificar, cuantificar y correlar medidas realizadas con los prototipos y con técnicas de calidad en fruta. En la

mayoría de los casos su uso directo no ha sido posible y ha sido necesario adaptarlos a cada aplicación. Las modificaciones van desde simples alteraciones de las rutinas de representación de resultados hasta modificaciones substanciales del funcionamiento interno de algún algoritmo neuronal. De hecho, la modificación, adaptación, aplicación a los objetivos perseguidos y evaluación de resultados utilizando diferentes algoritmos es una de las tareas más novedosas e importantes realizadas en el marco de este proyecto.

Todo el trabajo realizado ha sido posible gracias a la financiación por parte de dos proyectos de investigación. En concreto, el “Comité Econòmic de la fruita de Lleida” financió un primer año de estudios bajo el proyecto titulado “Diseño de una nariz electrónica para la determinación no destructiva del grado de maduración de la fruta dulce”, con el que se pudo completar el estudio de viabilidad utilizando un primer prototipo. Posteriormente, a través del ministerio de Ciencia y Tecnología, el estudio tuvo continuidad a través del proyecto CICYT- 2FD-97-0436 (TIC), de dos años de duración y en el que el “Comité Econòmic de la Fruita” intervino como entidad colaboradora.

En este segundo proyecto, el “Area de Postcollita” del centro de investigación mixto “Universitat de Lleida” (UdL) – “Institut de recerca en tècniques agraries” (IRTA) formó parte del equipo de investigación, incorporación que permitió contrastar los resultados obtenidos con el segundo prototipo con indicadores de calidad de fruta. Fue la colaboración de ambas entidades lo que permitió, desde un primer momento, identificar las necesidades del sector frutícola, escogiendo las variedades de fruta de mayor interés, los indicadores de calidad más utilizados y los objetivos con mayor interés comercial.

Con la claridad de exposición en mente, se ha creído conveniente estructurar la exposición del trabajo realizado en esta tesis doctoral en ocho capítulos. En el segundo capítulo se repasan brevemente las técnicas convencionales de control de madurez y calidad de la fruta, así como técnicas más novedosas basadas en la identificación y cuantificación de los componentes aromáticos emitidos por la fruta durante su proceso de maduración. El contenido de este capítulo expondrá las ventajas y desventajas de

estos métodos convencionales que también han sido utilizados en este trabajo para poder comparar la eficacia de la nariz electrónica como instrumento de medición de calidad y madurez de la fruta frente a técnicas convencionales.

En el capítulo tres se describen con detalle los dos prototipos de olfato electrónico diseñados en el seno de este trabajo. Un primer sistema permitió evaluar la viabilidad de la idea, mientras que el segundo fue diseñado partiendo de la experiencia anterior. Su perfeccionamiento permitió utilizarlo con una variada selección de frutos y generar resultados lo suficientemente fiables como para obtener una serie de conclusiones finales.

Como ya se ha comentado previamente, una de las características que diferencia a todo sistema de olfato electrónico frente a los analizadores de gases convencionales es la inclusión de algoritmos de inteligencia artificial que exploten la multidimensionalidad de los datos recibidos de la matriz de sensores químicos. En el capítulo 4 se describen los algoritmos utilizados, la mayoría de ellos ya considerados clásicos en el área del reconocimiento de patrones. Sin embargo, como un resultado colateral de esta tesis, se presentan algunas modificaciones interesantes a algoritmos conocidos que permiten aumentar la utilidad de los mismos en aplicaciones basadas en sistemas de olfato electrónico.

Los capítulos cinco, seis y siete presentan las diferentes experiencias realizadas con los tres tipos de fruta utilizados: melocotones, peras y manzanas respectivamente. En cada uno de ellos se describen las experiencias realizadas tanto con el primer como con el segundo prototipo, presentando los resultados obtenidos y discutiendo las dificultades y soluciones aportadas para los objetivos de cada experiencia.

Finalmente, en el capítulo 8 se presentan las conclusiones de este trabajo y las líneas de investigación que, a opinión del autor, deberían continuar el trabajo realizado hasta la fecha.

REFERENCIAS

- [1.1] V.mathieu, C.Tronel, J.Mazollier *Pink-Lady*, ref. 24620 ISBN 2-87911-101-3, Centre technique interprofessionnel des fruits et legumes (ctifl), Paris, 1998
- [1.2] R.H.H. Wills, T.H.Lee, W.B. McGlasson, E.G. Hall, D.Graham, *Fisiología y manipulación de frutas y hortalizas post-recolección*, Ed. Acribia, Zaragoza, 1990
- [1.3] Rogers E. K., *Instrumentation and Sensors for the Food Industry*, Butterworth-heinemann Ltd, Oxford, U.K. 1993.
- [1.4] H. Shiota , *Changes in the volatile composition of La France pear during maturation*, Journal of the Science of Food and Agriculture, 52 (3) (1990) 421
- [1.5] M.L. López; M.T. Lavilla, I. Recasens, J. Graell, M.Vendrell, *Changes in aroma quality of ‘Golden Delicious’ apples after storage at different oxygen and carbon dioxide concentrations*, Journal of the Science of Food and Agriculture, 80, (2000) 311
- [1.6] Christensen C.M., *Effects of color on aroma, flavor and texture judgements of foods*, J. Food Sci., 48 (1983) 787-790
- [1.7] Pilando L.S., Wrolstad R.E, Heatherbell D.A., *Influence of fruit composition, maturity and mold contamination on the color and appearance of strawberry wine*, J. Food Sci., 50 (1985) 1121-1125
- [1.8] Povey, M.J.W., *Ultrasonics in food engineering. Part II: Applications*, Journal of Food Engineering, 9, (1989) 1-20
- [1.9] Dull, G.G., *Non-destructive evaluation of quality of stored fruits and vegetables*, Food Technology, May, (1986) 106-110
- [1.10] C.Ortíz et al, *Non-destructive determination of woolly peaches using impact response and Near-Infrared spectroscopy*, J. Agric. Eng, 78 (3) (2001) 281-289
- [1.11] W.F. Wilkens, A.D. Hatman, *An electronic analog for the olfactory processes*, Ann. NY Acad. Sci., 116 (1964) 608.

- [1.12] Gardner J.W., Barlett P.N., *A brief history of electronic noses*, Sensors Actuators B 18-19 (1994) 211-220
- [1.13] Hong, H. et al, *Electronic nose system with micro gas sensor array*, Sensors and Actuators B Vol. B36, (1996) 1-3
- [1.14] Singh, S., Hines, E. and Gardner, J., *Fuzzy neural computing of coffee and trained-water data from an electronic nose*, Sensors and Actuators B, Vol. B30 (1996)
- [1.15] Natale C., Davide F., D'Amico A., *An electronic nose for the recognition of the vineyard of a red wine*, Sensors Actuators B 33 (1996) 83-88
- [1.16] Schweizer-Berberich P.M., et al. *Characterisation of food freshness with sensor arrays*, Sensors and Actuators B, 18-19 (1994) 282-290
- [1.17] di Natale, C., et al., *An electronic nose for food freshness analysis*, Eurosensors X, Leuven september (1996) 681-684
- [1.18] di Natale, C., et al., *Recognition of fish storage time by metalloporphyrins-coated QMB sensor array*, Measurement Science and Technology, Vol. 7, (1996) 8
- [1.19] Smith P., *Sense for food*, Sensor Review, vol. 9, 1 (1989) 15-20
- [1.20] C. Visai, M. Vanoli. *Volatile compound production during growth and ripening of peaches and nectarines*. Scientia Hortoculturae 70 (1997) 15-24
- [1.21] T. Lavilla, J.Puy, M.L.López, I. Recasens and M.Vendrell, *Relationships between Volatile Production, Fruit Quality, and Sensory Evaluation in Granny Smith Apples stored in different Controlled-Atmosphere Treatments by means of multivariate analysis*, J. of agri. And food chem., vol 47, no.9, (1999) 3791-3803
- [1.22] Benady(15) Benady M., Simon J.E., *Fruit ripeness determination by electronic sensing*, Transactions of the ASAE, vol. 38, 1 (1995) 251-257
- [1.23] E. L. Hines, E.Llobet, J.W.Gardner, *Neural network based electronic nose for apple ripeness determination*, Electronics Letters, 35 (1999) 821
- [1.24] E. Llobet, E. L. Hines, J.W. Gardner, S. Franco, *Non-destructive banana ripeness determination using a neural network-based electronic nose*, Meas. Sci. Technol. 10 (1999) 538-548

[1.25] E.L.Hines, E.Llobet, J.W.Gardner, *Electronic noses: A review of signal processing techniques*, IEE Proceedings, Circuits Devices and Systems, Vol. 146, No. 6, (1999) 297-310