UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE

Facultad de Ciencias Agrarias Escuela de Ingeniería en Alimentos

Obtención de modelos digitales de alimentos de formas irregulares complejas mediante digitalización tridimensional

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al grado de Licenciado en Ingeniería en Alimentos

Francisco Alfonso Pino González

VALDIVIA – CHILE 2004 • Profesor Patrocinante:

Elton Francisco Morales Blancas Ingeniero en Industrias Alimentarias, Mg. Sc. Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos (ICYTAL)

• Profesor Informante:

.....

Fernando Emilio Figuerola Rivas

Ingeniero Agrónomo, Master of Science in Food Science Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos (ICYTAL)

• Profesor Informante:

.....

Erwin Ricardo Carrasco Ruiz

Ingeniero Civil Químico Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos (ICYTAL)

A Guadalupe González, mi madre, por el amor, valores y educación que me entregó desde niño y su esfuerzo cotidiano en velar por ello hasta hoy.

A Yenny Contreras, mi polola, por todo su amor, cariño, paciencia y apoyo incondicional entregado durante estos años.

A Cecilia, mi hermanita y a Tata Oscar por el gran apoyo e inmenso amor de familia.

A mis abuelos que Dios los tiene en su gloria.

Agradecimientos

- Al profesor Elton Morales, por el apoyo y guía en el desarrollo del trabajo de Tesis y su constancia al enseñarme una buena metodología de trabajo.
- A Cristian Rodríguez y Miguel Angel Gallardo por el apoyo técnico y ayuda en el desarrollo del presente trabajo de tesis.
- A la Dirección de Investigación y Desarrollo (DID) de la Universidad Austral de Chile, a través del Proyecto PEF 2003-02, por el financiamiento del presente trabajo de tesis.
- A la Universidad Austral de Chile, la Facultad de Ciencias Agrarias, la Escuela de Ingeniería en Alimentos y al Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, así mismo a todos los docentes, técnicos académicos y auxiliares que en conjunto forjaron mi saber durante estos años de estudio.
- A mis profesores colaboradores Sr. Fernando Figuerola y Sr. Erwin Carrasco, por su apoyo en la elaboración del trabajo de Tesis.
- A Yenny Contreras, por darme todo su amor, cariño, comprensión y ser quién me dio el apoyo incondicional en aquellos momentos difíciles de mi época de estudiante, al igual que su familia.
- A mi familia, por ser la fuente forjadora de mis valores y conocimientos.
- A la Sra. Silvia Rojas por sus consejos y su enorme apoyo durante mi vida estudiantil.
- A la familia Pérez Yusef por hacerme sentir parte de ella y ayudarme en toda mi época universitaria.
- A mis amigos de siempre, Rodrigo Toledo, Esteban Ramírez, Osvaldo Vivanco, Juan Pablo Pérez, Lionel Pinuer y muchos otros como Gerardo, Marcelo, Eduardo, Christian y la gran cantidad de amigos y amigas, como compañeros y tantos más que falta nombrar, junto a quienes compartí, me acompañaron e hicieron que el pasar por la Universidad Austral sea una época inolvidable de mi vida.

INDICE DE MATERIAS

Capítulo		Página
1	INTRODUCCION	1
2	REVISION BIBLIOGRAFICA	3
2.1	Ingeniería reversa	3
2.2	NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines)	9
2.3	Geometría digital	12
2.4	Digitalización 3D	13
2.5	Tecnología CAD/CAE	18
2.6	Parámetros de ingeniería	20
2.6.1	Parámetros de tamaño y forma	20
2.6.2	Descriptores de forma	23
2.6.3	Factores geométricos	24
3	MATERIAL Y METODO	26
3.1	Lugar de ejecución	26
3.2	Materiales y equipos	26
3.2.1	Alimentos evaluados	26
3.2.2	Réplicas de yeso	29
3.2.3	Sistema de digitalización 3D	29
3.2.4	Obtención de parámetros de tamaño y forma	31
3.3	Método	31
3.3.1	Obtención de réplicas de yeso	31
3.3.1.1	Espárragos	32
3.3.1.2	Brócolis	32

3.3.1.3	Camarones	32
3.3.1.4	Trozos de jurel envasados en bolsas esterilizables	36
3.3.2	Digitalización 3D de los modelos físicos	36
3.3.2.1	Trazado de mallas	36
3.3.2.2	Captura de puntos	37
3.3.3	Generación del modelo digital	39
3.3.4	Determinación de parámetros y descriptores de forma en	40
	los modelos digitales	
3.3.4.1	Determinación de parámetros de tamaño	40
3.3.4.2	Determinación de un descriptor de forma	41
3.3.5	Generación de las ecuaciones predictivas	42
4	PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS	43
4.1	Obtención de modelos digitales 3D para alimentos de	43
	formas irregulares complejas	
4.1.1	Calidad de mallado	43
4.1.2	Obtención de los modelos digitales 3D	45
4.2	Determinación de parámetros de tamaño y forma	53
	utilizando los modelos digitales de espárragos	
4.2.1	Validación del cálculo de las propiedades de los objetos	53
4.2.2	Refinamiento de malla	54
4.2.3	Ecuaciones predictivas	55
4.3	Aplicaciones de los modelos digitales 3D	58
4.3.1	Aplicaciones CAE (Computer Aided Engineering)	58
4.3.2	Otras aplicaciones	61
5	CONCLUSIONES	62
0		
6	RESUMEN	63
	SUMMARY	64

7	BIBLIOGRAFIA	65

ANEXOS

71

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Valores calculados y experimentales para volumen y	54
	diámetro de turiones de espárragos	
2	Valores obtenidos a diferentes resoluciones de malla	55
	en tres muestras de espárragos	

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Brazo digitalizador 3D y sus principales componentes	4
2	Esquema de ingeniería reversa	7
3	Curva NURBS	11
4	Taxonomía de procedimientos de captura,	14
	procesamiento y aplicaciones para datos puntuales	
	capturados mediante digitalización 3D	
5	Etapas en la reconstrucción de superficies	16
6	Representación del sistema de digitalización	18
	tridimensional	
7	Asparagus officinalis L.	26
8	Brassica oleracea L. var. Itálica	27
9	Haliporoides diomedeae	28
10	Bolsas esterilizables con trozos de jurel	28
11	Sistema de digitalización tridimensional	30
12	Puntas de precisión del brazo digitalizador	30
13	Obtención de réplicas de yeso en turiones de espárragos	33
	verdes	
14	Obtención de réplicas de yeso en floretes de brócoli	34
15	Obtención de réplicas de yeso en camarones	35
16	Trazado de la malla sobre la réplica de yeso	36
17	Montajes para la captura de puntos	38
18	Determinación del área superficial y volumen en el	40
	modelo digital	
19	Determinación del calibre en espárragos	41

20	Diferentes resoluciones aplicadas en la malla. Modo	44
	esquelético	
21	Diferentes resoluciones aplicadas en la malla. Modo	45
	sombreado	
22	Puntos de la malla capturados durante la digitalización	46
	de una réplica de turión de espárrago verde	
23	Modelo digital 3D en modo esquelético de espárrago	47
	verde	
24	Modelo digital 3D en modo sombreado de espárrago verde	47
25	Vista en perspectiva de un modelo digital finalizado de	48
	turión de espárrago	
26	Modelo digital de florete de brócoli en modo esquelético	49
27	Modelo digital de florete de brócoli en modo sombreado	50
28	Modelo de camarón digitalizado en modo esquelético	51
29	Modelo de camarón digitalizado en modo sombreado	51
30	Modelo digital de trozos de jurel envasados en bolsas	52
	esterilizables en modo esquelético	
31	Modelo digital de trozos de jurel envasados en bolsas	53
	esterilizables en modo sombreado	
32	Efecto del peso y volumen sobre el área superficial	57
33	Efecto del peso y volumen sobre el descriptor de forma	57
34	Modelo 3D digital de espárrago en simulación de	58
	transferencia de calor	
35	Modelo 3D digital de brócoli en simulación de	59
	transferencia de calor	
36	Modelo 3D digital de camarón en simulación de	60
	transferencia de calor	
37	Modelo 3D digital de bolsa esterilizable en simulación de	60
	transferencia de calor	

INDICE DE ANEXOS

1 Parámetros experimentales y calculados para turiones	72
de espárragos	
2 Parámetros y descriptores de forma para turiones de	75
espárragos	
3 Método de digitalización con MicroScribe TM en	77
Rhinoceros®: Generación de superficies a partir de una	
malla de puntos	
4 Método de digitalización con MicroScribe [™] en	82
Rhinoceros®: Generación de superficies a partir de	
curvas de puntos interpolados	

1. INTRODUCCION

Cuando se quiere evaluar la tasa de respiración, permeabilidad de gases y la transferencia de calor y materia a través de los alimentos durante los diferentes procesos o almacenamiento, es necesario conocer ciertas propiedades de forma y tamaño que permitan describir la geometría del alimento, como son principalmente el área superficial y volumen. Actualmente, se disponen de soluciones analíticas para calcular el área superficial para objetos de formas regulares (cilindros, esferas, rodajas, varillas, paralelepípedos) e irregulares (pirámides, conos, semiconos, elipsoides). Sin embargo, para el caso de formas irregulares complejas estos tipos de soluciones no son aplicables; y en el caso de aplicarse algunas de ellas, éstas usualmente presentarían un error generado por la aproximación en la forma que sigue el alimento.

La Ingeniería Reversa es hoy en día una metodología integrada, consolidada en los procesos de diseño para reconstruir superficies desde prototipos físicos, utilizando para ello técnicas para la captura de la forma y la posterior reconstrucción en modelos digitales tridimensionales. Una de las técnicas para hacer Ingeniería Reversa, que ha logrado una alta masificación en el mundo tecnológico dada su versatilidad, es la digitalización tridimensional (3D). Esta técnica permite acceder a las irregularidades que normalmente presentan los objetos de formas complejas y de esta manera capturar con aceptable precisión la forma de éste.

Basándose en los antecedentes citados, el objetivo general de la presente investigación fue:

1

 Aplicar los principios de la Ingeniería Reversa para obtener modelos digitales de alimentos de formas irregulares complejas y sus respectivos parámetros de ingeniería.

Para lograr el objetivo general los objetivos específicos se detallan a continuación:

Objetivos específicos:

- Capturar mediante digitalización 3D las formas irregulares complejas de algunos alimentos como turiones de espárragos verdes, floretes de brócoli, camarones y trozos de jurel envasados en bolsas esterilizables.
- Calcular el área superficial (A_s), volumen (V) y otros parámetros en alimentos de formas irregulares complejas, necesarios en el campo de la ingeniería aplicada.
- Obtener modelos predictivos para determinar algunos parámetros de ingeniería mediante mediciones simples y prácticas utilizadas durante su manejo y procesamiento.

2. REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 Ingeniería reversa

Para comprender el término ingeniería reversa, se debe considerar que mientras la ingeniería convencional transforma conceptos y modelos en partes reales, la ingeniería reversa es aquella disciplina que toma esas partes reales y las transforma en conceptos y modelos (VÁRADY **et al**., 1997).

La ingeniería reversa es un proceso para construir o generar un modelo a partir de sus propiedades. Ha sido exitosamente utilizado en dominios donde las propiedades pueden ser cuantificables, tales como la optimización de partes mecánicas bajo altos niveles de estrés y tiene su aplicación cada vez más difundida en sistemas computacionales CAD¹/CAM²/CAE³ (BOSINCO **et al**., 1998).

La metodología como tal se inicia en el análisis de un objeto, del cual la superficie puede deducirse en un modelo digital idéntico, explotando el uso de la tecnología CAD, ya que debido a las extensas ventajas que proporciona el uso del computador con dicha tecnología, se ve aumentada la eficiencia, calidad de diseño, fabricación y análisis del objeto a ser estudiado (BORDEGONI y FILIPPI, 2001).

Por consiguiente, la finalidad de esta metodología es producir una copia íntegra o sólo una parte del objeto, cuando no hay disponible modelos o documentación que se ajusten de manera exacta a los requerimientos que se necesiten, o

¹ Computer-Aided Design, Diseño Asistido por Computador

² Computer-Aided Manufacturing, Fabricación Asistida por Computador

³ Computer-Aided Engineering, Ingeniería Asistida por Computador

cuando se vea imposibilitado el obtener de manera precisa una copia del objeto existente cuando es necesario realizar un análisis o alguna modificación para su estudio o evaluación (RAZDAN et al., 1998).

VÁRADY **et al**. (1997) caracterizaron la metodología de ingeniería reversa en cuatro etapas bien definidas, las cuales son: captura de datos, preprocesamiento, segmentación y adecuación de superficie, y creación del modelo CAD.

a) Captura de datos. En ésta etapa destaca el tipo de método de adquisición de datos, esto debido a que existen variados métodos, los cuales se subdividen en: métodos sin contacto (ópticos, acústicos y magnéticos) y métodos táctiles o de contacto. Estos últimos métodos fueron utilizados en esta investigación, utilizando un brazo robótico digitalizador (FIGURA 1).



FIGURA 1. Brazo digitalizador 3D y sus principales componentes.

Cada método utiliza esencialmente algún mecanismo o fenómeno para interactuar con la superficie del objeto en estudio. Así, en los métodos táctiles la superficie del objeto es palpada usando sondas mecánicas en el extremo del brazo digitalizador y las partes sensibles en las articulaciones del brazo determinan la ubicación de la coordenada relativa.

Este método es muy limitado para medir grandes superficies y constituye el método de adquisición de datos más lento. Sin embargo, en superficies pequeñas e irregulares son los más robustos, más precisos y más repetibles (VÁRADY **et al.**, 1997).

En los métodos sin contacto, la luz, sonido o campos magnéticos son usados, siendo uno de los más utilizados el método de digitalización láser, el cual entrega información directamente de las trayectorias de muestreo con puntos (x, y, z). Dicho método, sin embargo, presenta limitación en cuanto al acceso a espacios recónditos e inestabilidad en las coordenadas determinadas. Así muchas veces existe el problema de obtención de datos precisos, lo cual ha dado paso a la clasificación, reducción y representación de ellos (RUIZ, 2000).

En resumen, todos los métodos deben interactuar con la superficie usando algún fenómeno, luz, sonido, magnetismo o contacto físico. La velocidad con la cual el fenómeno opera, así como la velocidad de la parte sensible, determinará la velocidad de la adquisición de datos.

VÁRADY **et al**. (1997), además señalan que algunos problemas prácticos en la adquisición de datos son:

 <u>Calibración</u>: parte esencial del montaje y operación en la ubicación de la parte a medir. Un error de sensibilidad sistemático puede ocurrir si se ignora este paso.

- <u>Precisión</u>: mientras mayor sea la precisión del sensor, mayor será la precisión de los datos adquiridos.
- <u>Accesibilidad</u>: la digitalización de un objeto no resulta fácil si su forma no es accesible en plenitud por el sistema de adquisición de datos debido a la configuración y topología del objeto.
- <u>Finalización de la superficie</u>: cuando se quiere finalizar una superficie, es decir, capturar los últimos datos que la conforman, se debe proceder con cautela ya que es un proceso engorroso, esto debido a que idealmente un escáner debería de capturar todos los datos de un objeto que estuviera flotando en el espacio sin ser tocado, pero como esto no es posible, se debe terminar con caución, estableciendo un método apropiado para realizar dicho procedimiento de cierre.
- b) Preprocesamiento. Este procedimiento entrega como resultado una conexión de puntos que conforman un conjunto de datos, resultando una unión entre estos puntos cercanos de manera tal que constituyan una estructura ordenada para el establecimiento de la superficie como tal (LI et al., 2002).
- c) Segmentación y adecuación de superficie. Una vez ordenado el conjunto de puntos se procede a una segmentación que los divide en subconjuntos donde cada subdivisión incluye aquellos puntos que contienen los datos que forman la superficie en particular, procediendo a clasificarlos y decidir qué tipo de superficie corresponde a cada subdivisión, por ejemplo una plana, cilíndrica, etc., para luego adecuar la mejor superficie que se ajuste a todos aquellos puntos dados por cada subconjunto.
- d) **Creación del modelo digital.** Una vez finalizadas las etapas anteriores, se obtiene el modelo digital tridimensional, que corresponde a una

superficie denotada por todos aquellos puntos o conjunto de datos capturados, la cual permite realizar los análisis programados o los objetivos estimados con su creación.

BORDEGONI y FILIPPI (2000) sostienen que antiguos procedimientos de ingeniería reversa necesitaban realizar mediciones manuales de alguna parte del objeto, por ejemplo midiendo calibres, copiando información de diseños anteriores o ambos, lo cual es ahora reemplazado por nuevos métodos, reduciendo el consumo de tiempo. También señalan que es posible realizar alguna modificación a diseños anteriores por medio de simples operaciones de posicionamiento y escalamiento, la mayoría hoy integradas en los paquetes de software, hacen posible establecer la relación de espacio de trabajo entre el modelo original y el digitalizado, planteando el esquema de la FIGURA 2 sobre los pasos básicos para realizar el proceso.



FIGURA 2. Esquema de ingeniería reversa.

Básicamente estos nuevos métodos, por lo general, involucran dos procedimientos: digitalización de una parte física y el modelado tridimensional de la parte desde los datos digitalizados, permitiendo con ello su modificación para una infinidad de usos (NIELSON, 2000).

Una vez obtenido el modelo digital final, es posible realizar análisis y actualizaciones, lo cual permite una mayor flexibilidad, ya que dicho modelo se puede mantener en espera hasta que sea necesaria su utilización en posteriores análisis (STEINBERG **et al**., 1998).

Cuando se hace referencia a como se reconstruyen las superficies en los modelos digitales, se observa que en la mayoría de departamentos de diseño es común el uso de modelos físicos junto con herramientas computacionales. En estos departamentos se usan sistemas CAS (*Computer-Aided Styling*, Estilización Asistida por Computador) para la generación eficiente del concepto estilístico, donde la calidad, y en especial la cuantificación de los datos queda en segundo término. También se utilizan sistemas CAD, donde la calidad y la cuantificación de las superficies son esenciales, ya que tienen que ser suficientes para la generación de prototipos mediante técnicas de control numérico (ARNOLD, 2000).

En base a las soluciones para adecuar la superficie, el modelo holístico de ingeniería reversa siempre ofrece una solución; este modelo representa el cálculo de la mejor solución de acuerdo con las restricciones definidas, aunque ésta puede diferir de lo deseado de forma significativa. El método consiste en cerrar un bucle de optimización, partiendo de un modelo inicial con unas restricciones, y, usando un lazo de retroalimentación y un criterio de similitud, el sistema calcula una posible solución (MATA **et al**., 1999).

RUIZ y CAMACHO (2000) indican que el ajuste de superficies se puede asimilar desde dos puntos de vista: (i) matemático y (ii) algorítmico. Las fórmulas matemáticas se ajustan a los datos por medio de identificación de parámetros, si el orden de los datos no es relevante se pueden usar interpolaciones o procedimientos estadísticos. Sin embargo, las interpolaciones tienen la desventaja de presentar oscilaciones indeseables y costo computacional creciente en cuanto el número de puntos aumenta. Las técnicas estadísticas hallan las ecuaciones que se consideran más adecuadas para representar el conjunto de puntos muestreado. Ellas se usan en comprobación de tolerancias, en la cual las hipótesis de planaridad, cilindricidad, etc., se evalúan comparando las coordenadas del rasgo geométrico generado con los del rasgo geométrico real, o por medio de los coeficientes de correlación estadísticos.

Las aproximaciones matemáticas dependientes del orden del conjunto de puntos usan superficies atraídas por un poliedro de control, representativo del conjunto inicial. La elección del poliedro de control es obviamente crucial por varias razones: debe ser reducido, representar el conjunto de puntos, forzar continuidad selectivamente en las fronteras, no generar vértices erróneos, etc. La aproximación algorítmica enfoca la clasificación y partición del conjunto de datos, y la elección del poliedro de control. Es muy importante dado que es prerrequisito para aplicar métodos matemáticos (RUIZ, 2000).

2.2 NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines)

NURBS es el acrónimo de *Non-Uniform Rational B-Splines* (*B-Splines* Racionales No Uniformes). Las NURBS son representaciones matemáticas de geometría en 3D capaces de describir cualquier forma con precisión, desde simples líneas en 2D, círculos, arcos o curvas, hasta los más complejos sólidos o superficies orgánicos de formas libres en 3D. Gracias a su flexibilidad y exactitud las NURBS se utilizan extensivamente en la industria del CAD y más extensamente en computación para la generación de geometrías 3D. Los

modelos NURBS pueden usarse en cualquier proceso, desde la ilustración y animación hasta la fabricación (RHINOCEROS, 2002).

Una curva NURBS es en resumen un vector que evalúa la parte discreta de una función polinomial racional, siendo utilizada para definir la superficie de un modelo digital 3D con métodos de interpolación, adecuación y diseño seccional cruzado (PIEGL, 1991).

WILSON (2001) señala que una curva NURBS se define mediante tres elementos: puntos de control, grados y nodos:

- Puntos de control: lista de puntos que controlan la geometría de la curva NURBS. Excepto por los puntos extremos de una curva (o punto final, si es una curva cerrada), esos puntos de control están alejados de la curva (FIGURA 3, en color azul y sus puntos de control color negro). Actúan como magnetos atrayendo a la curva hacia sí mismos, y cuando uno de ellos es movido, la curva cambia para acomodarse a la nueva localización del punto de control. Inicialmente todos los puntos de control tienen el mismo poder, o *peso* como se lo denomina usualmente, para controlar la forma de una curva. Cuando una curva tiene puntos de control con pesos desiguales, se denomina *curva racional.* Rara vez se necesitan puntos de control con pesos para hacer curvas de secciones cónico-circulares, elipses, parábolas, entre otras.
- Grado: se refiere al grado del polinomio usado para crear la curva y determina la fuerza con la que el punto de control atrae a la curva. A menor grado la función base atrae más a la curva hacia los puntos de control.
- **Nodos**: Cada función base afecta sólo a la sección de la curva próxima al punto de control, y los extremos de dichos segmentos de denominan nodos.

El NU en NURBS significa no-uniforme, y se refiere al espaciado desigual de nodos.



FIGURA 3. Curva NURBS.

Si se cambia cualquiera de estos factores, cambia la forma de la curva (RHINOCEROS, 2002).

PIEGL (1991) señala que las principales razones de la amplia aceptación y popularidad de las NURBS son las siguientes:

- Ofrecen una forma común matemática para representar y diseñar formas y superficies.
- Al poder manipular los puntos de control, ellas ofrecen flexibilidad para diseñar una amplia variedad de formas.
- Su evaluación es rápida y computacionalmente estable.
- Otorgan interpretaciones geométricas limpias, siendo esto muy útil para evaluar y diseñar, debido a un excelente conocimiento de la geometría, especialmente de la geometría descriptiva.
- Sirven como un poderoso conjunto de herramientas para diseñar, analizar, procesar y evaluar objetos.

Las curvas y superficies NURBS proporcionan una poderosa herramienta en las manos de la comunidad académica e industrial que trabajan en el diseño y análisis de objetos. Un área de interés especial es la generación de un modelo digital tridimensional cuando la única información disponible es una nube de puntos 3D en la superficie del objeto, obtenido desde un sistema de digitalización. Esto es de especial interés para el modelado de objetos naturales como frutas, cuando éstas no pueden ser precisamente diseñadas de otra forma. Las NURBS son muy populares en el mundo del modelado geométrico académico y comercial. Sin embargo, dentro de sus desventajas se pueden señalar que algunos algoritmos son numéricamente inestables y además algunos algoritmos trabajan mejor con otras formas que con las NURBS, por ejemplo, al computar la intersección de dos superficies (DIMAS y BRIASSOULIS, 1999).

2.3 Geometría digital

Los objetos geométricos tales como puntos, líneas y polígonos son la base de una amplia variedad de importantes aplicaciones y dan paso a un conjunto interesante de problemas y algoritmos. El nombre geometría recuerda su uso más temprano: la medición de tierra y materiales. Hoy día los computadores están siendo cada vez mas usados para resolver problemas geométricos a mayor escala. En las pasadas dos décadas se ha desarrollado un conjunto de técnicas y herramientas que toma ventaja de la estructura proporcionada por la geometría. Esta disciplina se conoce como geometría computacional o digital. La geometría digital es una subdisciplina de la geometría discreta. Emerge como un campo de aplicación orientado e influenciado por las nuevas posibilidades gráficas de los computadores y el análisis de imagen digital. Las aproximaciones en el análisis de imágenes digitales están basadas en los conceptos de la geometría euclidiana (CHEN, 1996). KLETTE (2001) indica que la geometría digital, como rama, principalmente se enfoca en el estudio matemático de las propiedades geométricas de subconjuntos de figuras digitales, entendiendo unas definiciones básicas como figura digital (plano binario en una rejilla ortogonal rectangular) y punto (punto rejilla con coordenadas enteras) y señala que sus principales alcances son:

- Segmentación de figuras
- Simplificación de los subconjuntos de la figura
- Medidas de los subconjuntos de la figura
- Gráfica métrica para distancias en figuras
- Digitalización
- Convexitividad digital
- Recta digital

La geometría digital fue dominada en la primera etapa por conceptos topológicos y gráficos teóricos. Sin embargo, se redefinió el foco principal del campo, conduciendo a la definición de que la geometría digital es el estudio de propiedades geométricas del conjunto de una malla de puntos producto de regiones digitalizadas o curvas en el plano euclidiano (KLETTE, 2001).

2.4 Digitalización 3D

La recuperación de la forma a partir de muestreos de puntos (*x*, *y*, *z*) de la superficie externa de objetos como parte esencial de una metodología de ingeniería reversa es conocida como digitalización tridimensional y tiene aplicaciones no sólo en diseño de productos, sino en áreas hasta ahora más remotas como medicina, antropometría, entretenimiento y simulación de fenómenos físicos superficiales, cuya taxonomía se observa en la FIGURA 4. Así, considerando los beneficios y limitaciones de los datos digitalizados tridimensionales, la aplicabilidad de esta técnica puede ser considerada en variados casos de estudio (WILHITE, 2003).

Uno de los factores determinantes en una buena digitalización tridimensional es la calibración, definiendo un origen asociado al sistema de digitalización que coincida con las coordenadas originales para toda la digitalización. Una vez terminada esta operación de calibración es posible iniciar el proceso de adquisición de coordenadas tridimensionales con vista a generar la superficie (ALMEIDA **et al**., 2000).



FIGURA 4. Taxonomía de procedimientos de captura, procesamiento y aplicaciones para datos puntuales capturados mediante digitalización 3D.

En el análisis de imágenes digitales 3D, las medidas son sólo posibles cuando ellas están basadas en mallas de datos regularmente capturados de un sólido dado, asumiendo que los datos fueron definidos por un apropiado esquema de digitalización y una adecuada resolución de malla (KENMOCHI y KLETTE, 2000).

Al obtener los parámetros requeridos se pueden obtener correlaciones con otros parámetros fácilmente medibles, tales como masa, volumen y medidas dimensionales del objeto, las cuales forman la base para muchos modelos de predicción, útiles en la aplicación de la tecnología CAE y en la simulación computacional de procesos (CLAYTON **et al**., 1995).

La reconstrucción de superficies partiendo de un conjunto de puntos, incluye la adquisición de datos, reconstrucción topológica, y continuidad requerida para cada aplicación (prototipos rápidos, despliegue, cálculo de parámetros de forma, etc.). La geometría del objeto determina el tipo de muestreo y la mayor eficiencia de unos métodos sobre otros. De este mismo modo los datos de salida determinan el proceso de reconstrucción de la superficie. En el contexto de modelo geométrico, el concepto de topología se refiere a la información de conexión del esqueleto de un modelo tridimensional. Por el contrario, la geometría proporciona posiciones, dimensiones y formas (curvas, superficies, puntos) de las entidades de topología.

En referencia a la FIGURA 5, una vez que se obtiene el muestreo del conjunto de puntos, sigue la reconstrucción de la superficie, produciendo de esta manera un cascarón continuo. Se aplica postprocesamiento, en algunos casos para lograr una superficie paramétrica continua, o en otros casos para obtener una superficie continua optimizada para las aplicaciones posteriores (FEM, visualización, etc.), dado que la meta inmediata es un cascarón con geometría aceptable.



FIGURA 5. Etapas en la reconstrucción de superficies.

Como se señaló anteriormente en el sección 2.1, los métodos de captura del conjunto de puntos que describen la superficie de un objeto pueden ser de contacto y remotos. Los métodos de contacto han alcanzado un nivel razonable de flexibilidad dada la posibilidad de usar una plataforma para capturar puntos *x*, *y*, *z* con un brazo digitalizador. Los brazos digitalizadores son más lentos pero permiten acceder rasgos muy ocultos del objeto dada su configuración similar a un brazo de asistencia dental.

RUIZ (2000) informa que la estadística para el procesamiento de nubes de puntos obtenidos (x, y, z) típicamente actúa en:

- Formular y probar la hipótesis de planaridad, cilindricidad, perpendicularidad, etc., vitales en áreas como metrología.
- Converger a hipótesis verosímiles sobre los puntos físicos sobre la superficie a partir de información incompleta del muestreo, por ejemplo, de imágenes parcialmente superpuestas. En cada paso, se aplica una

aproximación cuadrada para encontrar la mejor transformación entre las imágenes.

Crear un conjunto de puntos alternativos al conjunto físico del muestreo, satisfaciendo el criterio de representatividad del punto original por el generado, calcula los puntos de control más aceptables para generar una superficie difiriendo lo menos posible de la forma continua del muestreo de puntos, toma los puntos más próximos dentro de la digitalización y halla su mejor plano representativo. Los planos se usan para definir la superficie en R³ que permite aplicar el algoritmo para obtener el cascarón continuo.

Los archivos de datos digitalizados son de tamaño mucho menor que aquellos obtenidos por otras técnicas de escaneo, permitiendo con esto que los archivos resultantes sean muy fáciles de manipular, inclusive con un computador no muy avanzado (WILHITE, 2003).

ALMEIDA **et al**. (2003) indican que la digitalización tridimensional puede desenvolverse en cualquier sistema y plataforma que se quiera incorporar como método de adquisición de datos, considerando tener bien estimados sus objetivos, inclusive considerando objetivos como la investigación y desarrollo y algunos de tipo económico. Estos autores señalan algunos objetivos importantes a considerar que son de suma utilidad:

- La capacidad de adquirir superficies de cualquier objeto.
- La elaboración y manipulación de una biblioteca de formas.
- Modelación de nuevas formas, basadas en los modelos digitalizados o existentes en la biblioteca.
- La capacidad de exportación de estas formas para ser utilizadas en sistemas de cálculo y simulación.
- La capacidad de las formas para ser tratadas con cualquier software CAD/CAE/CAM para estudios futuros.

En la FIGURA 6 se ilustra una representación del sistema de digitalización tridimensional de formas físicas, cabe señalar que este método es muy funcional por permitir reconstruir y manipular modelos existentes con una elevada fidelidad, lo que permite obtener nuevos modelos.



FIGURA 6. Representación del sistema de digitalización tridimensional.

2.5 Tecnología CAD/CAE

El crear prototipos computacionales (modelos digitales) es una alternativa emergente a los prototipos físicos. En los prototipos computacionales, se construye un modelo digital que es cercano al modelo físico donde la forma, el tamaño y otros parámetros son exactos. Se ha demostrado que un modelo digital preciso puede trabajar de modo similar a un prototipo físico y puede ser utilizado por las tecnologías CAD y CAE (MACIVER y NELSON, 2000).

En el contexto del desarrollo de la tecnología CAD, los objetivos son alcanzados a través de sofisticadas representaciones matemáticas de los objetos modelados y la exploración de las propiedades matemáticas de estas representaciones. El comportamiento de la forma está gobernado por ecuaciones matemáticas con ciertas interpretaciones físicas (KAGAN y FISCHER, 2000).

RUIZ (2000) indica que el uso de la tecnología CAD se ha potenciado últimamente por:

- a) Permitir más operaciones geométricas a ser representadas en el objeto durante su etapa de diseño.
- b) Permitir el diseño global de estructuras en vez de sólo componentes distintos.
- c) Proveer un diseño intuitivo, lo que significa que el proceso de diseño podría ser argumentado incrementando la flexibilidad y eficiencia del ciclo de desarrollo del producto.

La tecnología CAE es una alternativa a los procedimientos de cálculo convencionales que comúnmente se pueden encontrar en los *handbooks* de Ingeniería. Un progreso sustancial se ha realizado en los sistemas CAE que permite a los ingenieros diseñar, analizar, simular y visualizar la representación de las estructuras y procesos más complicados (DATTA, 1998).

Términos como CAE o ingeniería asistida por computador, como también el CAD o diseño asistido por computador se refieren al uso de los computadores para construir y evaluar modelos digitales de productos y procesos reduciendo el número de prototipos físicos y ensayos experimentales que pueden requerirse (KAGAN y FISCHER, 2000; DATTA, 1998).

Es útil hacer notar que el CAD tiene los mismos objetivos que el CAE pero está típicamente limitado a realizar manipulaciones sólo a la geometría y no al proceso (DATTA, 1998).

En el campo del análisis de ingeniería, los desarrolladores de software CAE que operan con el método de Elementos Finitos han progresado sustancialmente por medio de la simulación más realista del funcionamiento de eventos estructurales y procesos sobre un modelo digital capturado o diseñado. Más aún, los desarrolladores FEM (*Finite Element Method*, Método de Elementos Finitos) han incrementado dramáticamente el tamaño y complejidad de modelos digitales que pueden ser analizados numéricamente en un computador. Este desarrollo permite a los ingenieros evaluar análisis numéricos sobre modificaciones de los modelos originales de una forma más fácil y rápida (DEWULF **et al.**, 1999).

KAGAN y FISCHER (2000) evaluaron el potencial de la representación *B-spline* para representar los modelos geométricos digitales y su posterior análisis con el método de Elementos Finitos. Con ello, el representar objetos diseñados con funciones *B-Spline* ha demostrado ser una de las más exitosas aproximaciones en CADG (*Computer Aided Geometry Design*, Diseño Geométrico Asistido por Computador).

2.6 Parámetros de ingeniería

Muchos parámetros de ingeniería están asociados a procesos de la industria alimentaria, así cuando se quiere evaluar por ejemplo: la tasa de respiración, permeabilidad de gases y transferencia de calor en alimentos, es necesario conocer parámetros de tamaño y forma, descriptores de forma y factores geométricos.

2.6.1 Parámetros de tamaño y forma. El conocimiento de ciertas propiedades físicas de los alimentos como forma, tamaño, volumen y área superficial son importantes en muchos problemas asociados con el diseño de equipos y procesos (LAN y FANG, 2003).

La forma y tamaño son parámetros inseparables en un objeto físico, y ambos son necesarios si se desea describirlo satisfactoriamente. Además, para definir la forma deben medirse algunos parámetros dimensionales de tamaño (LANG y FANG, 2003). Los parámetros de tamaño son área superficial, volumen, perímetro, calibre, largo, entre otros. Los parámetros de forma son parámetros adimensionales, los cuales varían de 0 a 1, obtenidos de combinaciones de parámetros de tamaño (PACIORNIK, 2003).

Por lo tanto, un diseño apropiado de máquinas y procesos para cosechar, manipular y almacenar materiales agrícolas y convertirlos en productos alimenticios, requiere una estimación precisa de la forma, para lo cual es necesario conocer sus parámetros de tamaño como volumen, área superficial, y otros parámetros de ingeniería (gravedad específica, porosidad, entre otros) (LAN y FANG, 2003).

Dichos parámetros son primordiales en cálculos de ingeniería, por esto desarrollar un apropiado método para obtenerlos, es de vital importancia. A continuación se describen algunos trabajos en este ámbito:

CLAYTON et al. (1995) estudiaron la aplicación de diferentes métodos para calcular área superficial para manzanas de diferentes cultivares, utilizando métodos fórmulas, de elementos finitos, entre otros. Ellos señalan ciertas inexactitudes de los métodos evaluados y sugieren futuros estudios en nuevos métodos que permitan mejorar la obtención de dichos parámetros.

Basándose en métodos de aproximación NARUSHIN (2001) dedujo una ecuación para representar el perfil de un huevo de ave, descrito matemáticamente por el valor de su largo y diámetro máximo, e indica que el conocimiento del contorno geométrico es un método conveniente para el cálculo del área superficial y volumen.

Diferentes autores han implementado técnicas diferentes para obtener estos parámetros como HAHN y SANCHEZ (2000) quienes utilizaron un método de fotografía por cámara CCD (Charge Coupled Device) para implementar nuevos algoritmos y de este modo determinar el volumen en zanahorias.

Otros autores de la misma línea, como SABLIOV **et al.** (2002), desarrollaron un método basado en el procesamiento de imagen para medir el volumen y el área superficial de productos agrícolas elipsoidales tales como huevos, limones, limas y duraznos. El método asume que cada producto tiene una geometría axisimétrica, ellos calculan el volumen del producto y el área superficial como la suma de los volúmenes y de las áreas superficiales de troncos individuales usando Matlab®, de modo similar a lo realizado por FORBES (2000) quien utilizó imágenes digitales capturadas por equipos usados en la clasificación y detección de defectos en el embalaje de frutas, para así estimar los volúmenes de la fruta mediante algoritmos computacionales.

Obtener la forma geométrica de un alimento cada vez cobra mayor interés (DEWULF et al., 1999). Estos autores expresan que la introducción de computadores cada vez más potentes y nuevos equipos en la adquisición de datos, aparecidos durante la última década, ha hecho posible el poder aplicar nuevas técnicas para investigar la influencia de varios parámetros de ingeniería en la maduración de frutas. El método está aplicado en la construcción de un modelo geométrico digital 3D de una pera, para la aplicación de análisis de elementos finitos en la determinación del factor de firmeza.

Otros autores como NORTON **et al.** (2002) determinaron el volumen y área superficial de piernas en personas utilizando para ello digitalización láser, logrando establecer una técnica novedosa para determinar propiedades de masa en humanos. De modo similar WILHITE (2003) utilizó la digitalización tridimensional utilizando brazos robóticos para obtener datos morfológicos

externos de fósiles de dinosaurios y con esto capturar la forma para posteriores estudios morfológicos, ontogenéticos y biomecánicos.

2.6.2 Descriptores de forma. Los descriptores de forma se utilizan para medir la distorsión de la forma irregular de un objeto que está siendo considerada desde una geometría simple.

SMITH et al. (1967; 1968) fueron los primeros en utilizar descriptores de forma en el cálculo de tiempos de proceso de alimentos irregulares. Ellos definieron un índice geométrico el cual fue calculado desde un modelo de forma elipsoidal que tenía áreas de secciones transversales ortogonales iguales y de la misma dimensión característica de aquella de forma irregular que substituye. Las secciones transversales ortogonales elegidas fueron generalmente las más pequeñas y más grandes de longitud que pasan a través del centro termodinámico, que se sitúan en el mismo plano que la dimensión característica y que son perpendiculares entre sí. El descriptor de forma definido por los autores citados fue "la razón entre la longitud del eje mayor con la longitud del eje menor para la elipse que modela la sección transversal ortogonal".

De acuerdo a lo señalado por CLELAND **et al.** (1987b), otros descriptores de forma utilizados son: "la razón entre la distancia máxima desde el centro termodinámico a la superficie y la mitad de la dimensión característica" o "la razón del volumen del objeto comparado con el volumen de un cilindro infinito (para formas 2D) o esfera (para formas 3D) de la misma área superficial". Los descriptores de forma en general tienen propiedades levemente diferentes, así que todos éstos podrían, individualmente o en combinación, ser utilizados para representar la forma en los cálculos de factores geométricos para formas irregulares.

2.6.3 Factores geométricos. Los factores geométricos son índices utilizados para tomar en cuenta el efecto de la geometría sobre los cálculos de tiempos de proceso (CLELAND **et al.**, 1987a; 1987b; PHAM, 1991).

En el campo de la ingeniería aplicada a alimentos los métodos utilizados para calcular tiempos de proceso son de 2 tipos: métodos numéricos y métodos fórmula. Los métodos numéricos requieren de una considerable capacidad de software y hardware. Debido a que estos recursos no siempre se encuentran disponibles, los ingenieros en alimentos deben confiar en formulas simples para predecir los tiempos de proceso. Así, los tiempos de proceso para formas irregulares pueden estimarse modificando los tiempos calculados para formas unidimensionales utilizando factores geométricos como EHTD ("Equivalent Heat Transfer Dimensionality") y MCP ("Mean Conducting Path length"). Tales factores son específicos para la geometría y las condiciones de proceso involucrados (CLELAND **et al.,** 1987b; PHAM, 1991; ZUÑIGA, 2000).

CLELAND et al. (1987a) demostraron que para objetos regulares multidimensionales, las variaciones de los factores geométricos (EHTD) con los números de Stefan y Plank, temperatura final del centro termodinámico y variaciones de las propiedades térmicas pueden despreciarse. Los autores citados demostraron que los efectos de estos factores sobre rangos de proceso típicamente encontrados eran pequeños comparados con el número de Biot y los efectos de la forma. CLELAND et al. (1987b) señalan que lo mismo puede esperarse para las formas irregulares. Así, proponen un método para calcular EHTD y MCP para formas irregulares a partir de parámetros fácilmente medibles como: la dimensión característica (D), área superficial (A), volumen (V), algunos grupos adimensionales relevantes tales como el número de Biot, y un descriptor de forma.
El parámetro *D* no es siempre medido directamente. Para una forma irregular, *D* se define como: i) el espesor más pequeño medido por una línea que pasa a través del centro termodinámico; o ii) dos veces la distancia más corta del centro termodinámico a la superficie del objeto. La posición del centro termodinámico no siempre se puede estimar fácilmente a partir de una examinación superficial del objeto; además, puede cambiar de posición durante el proceso. Para las formas más comunes (no altamente torcidas), donde las condiciones superficiales no varían con la posición, las dos definiciones de D son virtualmente equivalentes.

3. MATERIAL Y METODO

3.1 Lugar de ejecución

La parte experimental de este trabajo de investigación fue llevada a cabo en el Laboratorio de Digitalización 3D e Ingeniería Asistida por Computador para el Procesamiento y Preservación de Alimentos (FoodDigiCAELab) del Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos (ICYTAL) de la Universidad Austral de Chile.

3.2 Materiales y equipos

3.2.1 Alimentos evaluados. Los alimentos de formas irregulares complejas sometidos a digitalización 3D fueron:

a) Espárragos. Se utilizaron espárragos verdes de la especie comestible, pertenecientes a la familia Liliaceae, especie *Asparagus* y género *officinalis*, denominado comúnmente *Asparagus officinalis* L. (FIGURA 7).



FIGURA 7. Asparagus officinalis L.

Para el estudio se utilizaron turiones de espárragos del cultivar UC-72, recolectados durante la temporada de cosecha (octubre-diciembre) en la Estación Experimental Santa Rosa de la Universidad Austral de Chile y se trasladaron al Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos de la Universidad Austral de Chile, en una caja de polietileno expandido, donde fueron almacenados en refrigeración a 10 °C y 95% de humedad relativa.

Cada muestra fue cortada a un largo de 17 cm desde el ápice y su calibre medido a 2,5 cm de su base de acuerdo a las normas para espárragos de exportación descrito en el CODEX STAN 225 (2001).

b) Brócoli. Se utilizaron brócolis verdes de la especie comestible. Estos pertenecen a la familia de las crucíferas variedad itálica forma cymosa, de nombre científico *Brassica oleracea* L. var. *itálica* (FIGURA 8). Está formada por una cabeza central y brotes laterales rodeado por botones florales. Fueron adquiridos en el mercado local y debido a su consistencia y perecibilidad fueron almacenados en refrigeración a 10 °C y un 95% de humedad relativa.



FIGURA 8. Brassica oleracea L. var. itálica.

c) Camarones (Gambas). Nombre científico *Haliporoides diomedeae* (FIGURA 9), perteneciente a la familia Solenoceridae, es un crustáceo decápodo que habita en aguas profundas. Fueron adquiridos en el mercado central de Santiago y debido a su consistencia y perecibilidad fueron almacenados en refrigeración a 5 °C y 95% de humedad relativa.



FIGURA 9. Haliporoides diomedeae.

d) Trozos de jurel envasados en bolsas esterilizables. Las bolsas esterilizables (FIGURA 10) fueron suministradas por Pesquera San José. Estas contenían trozos de jurel y estaban selladas al vacío. Sus dimensiones aproximadas eran de 20 cm de largo por 17 cm de ancho y tenían un peso drenado de 240 g.



FIGURA 10. Bolsas esterilizables con trozos de jurel.

3.2.2 Réplicas de yeso. Para obtener las réplicas de yeso de los alimentos de formas irregulares complejas, se usaron procedimientos de tecnología dental para lo cual se utilizaron los siguientes materiales:

- Agua.
- Material de impresión de Alginato JELTRATE®.
- Yeso de color blanco ISODENT®.
- Yeso de color amarillo ISODENT®.
- Vaselina sólida.
- Vaselina líquida.
- Cuchillos especiales.

3.2.3 Sistema de digitalización 3D. El sistema para la digitalización tridimensional montado, que se ilustra en la FIGURA 11, está compuesto por:

- Brazo digitalizador 3D de precisión Microscribe-3DL (Microscribe-3D[™], Immersion Co., San José, CA USA).
- Punta de aguja de precisión Estándar (FIGURA 12a).
- Punta de aguja de precisión Extra Fina (FIGURA 12b).
- PC Pentium 4 de 1.8 Mhz, 1 GB RAM y 128 MB en video.
- Software modelador 3D Rhinoceros® 3.0 SR3 (Robert McNeel & Associates, Seattle, WA USA).
- Lápices permanentes finos y grafito Nº2.
- Pistola sellante de goma.
- Plataforma de soporte.



FIGURA 11. Sistema de digitalización tridimensional.



FIGURA 12. Puntas de precisión del brazo digitalizador.

3.2.4 Obtención parámetros de tamaño y forma. Para mostrar una de las potenciales aplicaciones de la digitalización tridimensional en la determinación de descriptores de forma para alimentos de formas irregulares, se utilizaron los turiones de espárragos como material de prueba.

Para caracterizar cada turión fueron medidos el volumen, peso y calibre. El volumen experimental se obtuvo mediante el principio de Arquímedes, el calibre se midió con un pie de metro digital, y el peso se obtuvo con una balanza analítica de precisión.

Los materiales utilizados para la caracterización de los espárragos fueron:

- Agua destilada.
- Probeta de vidrio 200 ml.
- Pie de metro digital Fowler & NSK.
- Balanza analítica digital CHYO JK-200, Japón.

3.3 Método

El método utilizado, basado en los principios de ingeniera reversa, consistió en la adecuación de una plataforma compuesta por *hardware* y *software* comerciales utilizados por la industria del cine, automotriz entre otras, para ser aplicada en la captura de la forma en alimentos de formas irregulares complejas. A continuación se señala en forma detallada la metodología seguida para la obtención de los modelos digitales tridimensionales.

3.3.1 Obtención de réplicas de yeso. Debido a problemas de perecibilidad y de manipulación de las muestras (espárragos, brócolis y camarones) fue necesaria la obtención de réplicas de yeso utilizándose para ello la tecnología dental. Las réplicas permitieron contar con modelos físicos de los alimentos durante todo el estudio.

Antes de obtener las réplicas, los alimentos en estudio fueron limpiados para evitar defectos posteriores en las réplicas (MACIVER y NELSON, 2000).

3.3.1.1 Espárragos. Los turiones de espárragos fueron sometidos a limpieza para extraer restos de tierra y otras partículas ajenas. Posteriormente, fueron puestos sobre una base de material de impresión de alginato para obtener los moldes de sus formas de manera similar a aquella realizada para la elaboración de prótesis dentales. Una vez seco cada espárrago fue extraído del molde de alginato llenándose luego éste con yeso. Se dejó en reposo aproximadamente 36 a 48 horas para luego extraer la réplica, como se ilustra en la FIGURA 13.

3.3.1.2 Brócolis. Para el caso de brócolis se confeccionaron réplicas de yeso a partir de floretes de 70 y 50 mm de longitud, siguiéndose un procedimiento similar al realizado para el caso de espárragos, con la salvedad que por la complejidad de los floretes se debió realizar en dos etapas. La primera consistió en cubrir hasta la mitad del alimento con el material de impresión de alginato. Se dejó endurecer por 5 minutos para luego cubrir con alginato el resto del brócoli. Después de aproximadamente 36 a 48 horas se extrajeron las réplicas o modelos físicos, como se ilustra en la FIGURA 14.

3.3.1.3 Camarones. Estos fueron lavados y sometidos inmediatamente a la obtención de sus moldes, debiéndose trabajar con más prolijidad por las características de textura y fragilidad del producto. El procedimiento seguido fue idéntico al realizado para el caso de brócolis, el cual se observa en la FIGURA 15. Primero se cubrió el camarón con el material de impresión de alginato hasta la mitad, se dejó endurecer por 5 minutos para luego cubrir con alginato el resto del producto. Posteriormente se dejó en reposo por aproximadamente 36 a 48 horas para luego extraer la réplica.



FIGURA 13. Obtención de réplicas de yeso en turiones de espárragos verdes.



FIGURA 14. Obtención de réplicas de yeso en floretes de brócoli.



FIGURA 15. Obtención de réplicas de yeso en camarones.

3.3.1.4 Trozos de jurel envasados en bolsas esterilizables. Debido a la versatilidad en cuanto a su forma, las bolsas fueron instaladas directamente sobre el soporte de la plataforma y luego digitalizadas.

3.3.2 Digitalización 3D de los modelos físicos. Las etapas necesarias para la digitalización de las réplicas de yeso o los modelos físicos originales se detallan a continuación:

3.3.2.1 Trazado de mallas. El primer paso para la digitalización 3D consistió en el trazado de mallas sobre la superficie del modelo físico (MACIVER y NELSON, 2000). Se utilizó lápiz grafito de punta fina para el trazado de las mallas como se ilustra en la FIGURA 16.



FIGURA 16. Trazado de la malla sobre la réplica de yeso.

En todos los casos, cuando fue necesario, se trazó una malla más fina en aquellas zonas que presentaban mayor irregularidad. Con esto se logró una mejor representación digital del modelo físico.

Para determinar que mallado describe de manera más adecuada la forma irregular compleja de los modelos utilizados durante la digitalización 3D, se realizó una determinación de calidad de mallado cuyos resultados se muestran en la sección 4.1.1.

De la misma manera para determinar el tamaño óptimo entre puntos que conforman la malla o matriz, fue necesario realizar una evaluación a la resolución (número) de filas y columnas que de ahora en adelante se denotará como "refinamiento de malla". Para este efecto se elaboró un diseño experimental de 1 factor (mallado) en 3 niveles (resolución 8x14, 12x20, 42x28) siendo las variables de respuesta evaluadas el área superficial, volumen y calibre. Para todo lo anterior se evaluaron 3 muestras (turiones de espárragos). Los resultados se muestran en la sección 4.2.2.

3.3.2.2 Captura de puntos. Para cada uno de los modelos físicos evaluados se diseñó un soporte específico y fueron montados sobre una plataforma de trabajo (FIGURA 17), siendo adheridos a ésta con goma adhesiva de fácil extracción una vez finalizado el proceso. Todos los modelos físicos fueron colocados de manera tal que la superficie fuese accesible por completo para la punta del brazo digitalizador.

Para capturar los puntos resultantes del trazado de la malla sobre cada modelo físico se implementaron dos procedimientos de reconstrucción de superficies. Ambos procedimientos implementados tienen el mismo principio de captura de puntos, sin embargo, siguen un esquema diferente en cuanto a la unión de éstos durante la digitalización y en la reconstrucción de la superficie para la creación del modelo digital.

El primer procedimiento (ANEXO 3) consiste en reconstruir superficies desde una "grilla de puntos". Esta opción del software necesita que se ingrese la matriz (números de filas y columnas) de puntos que fueron trazados previamente sobre la superficie de yeso, señalado en la sección 3.3.2.1. Cada coordenada de la malla fue ingresada ubicando, sobre cada punto de la matriz trazada en la superficie del modelo de yeso, la punta de aguja estándar del brazo digitalizador.



FIGURA 17. Montajes para la captura de puntos.

El segundo procedimiento (ANEXO 4) consiste en reconstruir superficies a partir de "Curvas de Puntos Interpolados". Esta opción del software permite generar una envolvente que se ajusta a las curvas cerradas capturadas, correspondientes a las filas de la malla trazadas sobre los modelos físicos. Cada coordenada de la malla fue ingresada ubicando, sobre cada punto de la matriz trazada en la superficie del modelo de yeso, la punta de aguja extra fina del brazo digitalizador. Esto se llevó a cabo iniciando en un punto fijo hasta cerrarla.

De acuerdo a la forma y complejidad de los modelos físicos a digitalizar se hizo necesario realizar pruebas preliminares para evaluar la aplicabilidad de los procedimientos de digitalización descritos. Así, se determinó que el primer procedimiento fue el apropiado para el caso de espárragos y trozos de jurel envasados en bolsas esterilizables, mientras que para floretes de brócoli y camarones el segundo procedimiento fue el más adecuado.

3.3.3 Generación del modelo digital. Una vez capturadas las coordenadas (x, y, z) de todos los puntos como se describió en la sección anterior, el software Rhinoceros® reconstruye la superficie y realiza su representación geométrica digital. La representación para todas las formas es realizada en base a curvas NURBS.

Aprovechando las capacidades del software se puede también calcular con exactitud el área superficial y volumen del modelo digital generado. Asimismo, por la versatilidad de las curvas, se pueden realizar ajustes como cortes, cierres y modificaciones permitiendo generar variaciones al modelo digital original. Lo anterior posibilitaría eventualmente dividirlo en varias secciones, analizar cada una por separado o exportarlo a software CAE de simulación de procesos térmicos para diversos análisis de cálculo numérico.

3.3.4 Determinación de parámetros y descriptores de forma en los modelos digitales. Como se mencionó en la sección 3.2.4 se utilizó como objeto de estudio turiones de espárragos verdes para mostrar las capacidades de información que se pueden obtener a partir de los modelos digitales de formas irregulares complejas. Las propiedades calculadas fueron el área superficial (A_S), volumen (V) y otros parámetros de tamaño como el calibre y perímetro, además con estos parámetros se pueden obtener descriptores de forma.

3.3.4.1 Determinación de parámetros de tamaño. Para determinar el área superficial, volumen y calibre se utilizó la capacidad del software Rhinoceros® de poder calcular las propiedades citadas del modelo geométrico digital ilustrada en las FIGURAS 18 y 19. En la FIGURA 18 se ilustra la manera de obtención del área superficial y volumen del objeto.



FIGURA 18. Determinación del área superficial y volumen en el modelo digital.

El calibre se obtuvo midiendo el diámetro mayor de la sección transversal del modelo digital correspondiente a una distancia de 2,5 cm medida desde la base como se muestra en la FIGURA 19.



FIGURA 19. Determinación del calibre en espárragos.

3.3.4.2 Determinación de un descriptor de forma. Para el presente trabajo el descriptor de forma seleccionado fue definido como "la razón entre el volumen del objeto comparado con el volumen de un cilindro infinito de la misma área superficial". Matemáticamente las expresiones involucradas fueron:

$$SHDE = \frac{V}{V_C}$$
(3.1)

$$V_C = \frac{\pi D^2 H}{4} \tag{3.2}$$

$$D = \frac{A_{\rm s}}{\pi H} \tag{3.3}$$

$$A_{\rm s} = \pi D H \tag{3.4}$$

donde:

- SHDE : Descriptor de forma
- V : Volumen del modelo digital
- *V_C* : Volumen de un cilindro infinito de la misma área superficial
- A_S : Área superficial
- D : Diámetro equivalente
- *H* : Longitud

3.3.5 Generación de las ecuaciones predictivas. El área superficial de objetos de formas irregulares complejas no es de fácil determinación en una planta de proceso; por lo tanto, se hace necesaria una estimación en base a modelos empíricos. Así, con propiedades como las determinadas en la sección anterior, además de otros parámetros fácilmente medibles en terreno, como peso (*P*) y calibre (*C*), se pueden buscar ecuaciones para predecir el área superficial y los descriptores de forma en función de las variables mencionadas.

Área superficial:

$$A_s = f(V, C) \tag{3.5}$$

$$A_{\rm s} = f(P,C) \tag{3.6}$$

Descriptor de forma:

$$SHDE = f(V,C) \tag{3.7}$$

$$SHDE = f(P,C) \tag{3.8}$$

Las ecuaciones resultantes fueron obtenidas mediante un análisis multivariable de regresión múltiple (HAIR **et al**., 1999), utilizando StatGraphics® Plus 5.1 (Statistical Graphics Corporation, Englewood Cliffs, NJ USA).

4. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

4.1 Obtención de modelos digitales 3D para alimentos de formas irregulares complejas

En esta sección se presentará los resultados de la implementación del método de ingeniería reversa con la finalidad de obtener modelos digitales de diferentes alimentos de formas irregulares complejas como turiones de espárragos, floretes de brócoli, camarones y trozos de jurel envasados en bolsas esterilizables.

Como se señalo en la sección 2.4, todo modelo digital puede ser utilizado varias veces y por su facilidad de intercambio pueden almacenarse y formar parte de una biblioteca de modelos digitales tridimensionales. En este caso los modelos obtenidos formarán parte del banco de datos para el Laboratorio de Digitalización 3D e Ingeniería Asistida por Computador para el Procesamiento y Preservación de Alimentos del ICYTAL (FoodDigiCAELab) para ser compartidos con la comunidad científica y profesional del área.

4.1.1 Calidad de mallado. Para establecer el mallado adecuado para la digitalización 3D se utilizaron 3 réplicas de yeso de turiones de espárragos, en las cuales se trazaron 3 resoluciones de malla diferentes.

En las FIGURAS 21 y 22 se observan las tres resoluciones evaluadas para una réplica de espárrago digitalizado. Apreciándose de izquierda a derecha: a) una resolución 8x14 que representa una matriz de puntos de 8 filas x 14 columnas con una separación promedio entre puntos horizontales de 0,8 cm, b) una resolución 12x20 que representa una matriz de puntos de 12 filas x 20

43

columnas con una separación promedio entre puntos horizontales de 0,5 cm; y, c) una resolución 42x28, que representa una matriz de puntos de 42 filas x 28 columnas con una separación promedio entre puntos horizontales de 0,3 cm. siendo la malla más fina que se logró trazar sobre la réplica de yeso.

Para cada modelo se observa que a medida que la resolución de malla disminuye, la calidad de detalles en la forma del modelo digital es menor. Así, en ambas figuras (FIGURA 20 y FIGURA 21) se observa que la resolución 42x28 es la que permite mostrar más detalladamente el objeto en estudio; por esto, fue la seleccionada para la digitalización de todos los modelos físicos considerados. En la sección 4.2.2 se presentará una evaluación cuantitativa de la calidad de malla y su importancia en los modelos digitales.





4.1.2 Obtención de los modelos digitales 3D. Se presenta la obtención de los modelos digitales de cuatro alimentos de forma irregular.

a) Turiones de espárragos. En la FIGURA 22 se observan los puntos (coordenadas x, y, z) que fueron capturados por el equipo MicroScribe-3DL durante la digitalización de réplicas de turiones de espárragos. En dicha figura se observa una sección aumentada para observar de mejor forma la cantidad de puntos y la secuencia que siguen los mismos para reconstruir el modelo. En ella se observa claramente que cada secuencia de puntos conduce a un anillo construido por *n* puntos de acuerdo al tipo y calidad de malla elegida, los cuales deben concordar con sus símiles del anillo siguiente. De esta manera el software elaborará el esqueleto del modelo.



FIGURA 22. Puntos de la malla capturados durante la digitalización de una réplica de turión de espárrago verde.

En la FIGURA 23 es posible visualizar la forma esquelética del modelo digital de espárrago verde resultante de las posiciones de los puntos en el espacio 3D. En esta forma esquelética se observa una imagen semitransparente donde se dibujan las aristas de la malla que constituye al objeto.

En la FIGURA 24 se puede observar claramente el modelo digital de espárrago verde en 4 vistas, una vista superior (lado izquierdo, arriba), una vista frontal (lado izquierdo, abajo), una vista en perspectiva (lado derecho, arriba) y una vista lateral (lado derecho, abajo).



FIGURA 23. Modelo digital 3D en modo esquelético de espárrago verde.



FIGURA 24. Modelo digital 3D en modo sombreado de espárrago verde.

En la FIGURA 24 el modelo digital ilustrado se observa en modo sombreado, característica del software para presentar los modelos. Además, se puede incluir textura para así resaltar propiedades del modelo o hacerlo más fotorealístico. Haciendo uso de las herramientas del software es posible además realizar acercamientos, rotar los modelos para evaluar de mejor manera su conformación, seguir alguna curva que sea de interés, eliminar los ejes o principalmente presentarlo como un modelo finalizado o como una fotografía.

En la FIGURA 25 se presenta el modelo en la vista en perspectiva en modo sombreado y esquelético a la vez, lo que da mayor ayuda visual para evaluarlo o resalta la calidad del modelo obtenido. Este modelo finalizado puede ser exportado en formato .3dm o .iges lo que facilita el intercambio con la mayoría de los software de ingeniería CAD ó CAE.



FIGURA 25. Vista en perspectiva de un modelo digital finalizado de turión de espárrago.

b) Floretes de brócoli. Para el caso de brócoli la obtención del modelo digital presentó mayores dificultades, esto debido a que tenía demasiadas irregularidades, especialmente de carácter de bajo relieve. La principal dificultad que presenta esta forma irregular es la cantidad de yemas florales y pedúnculos y lo asimétrico de cada uno. Para esto se debió cambiar la punta del brazo digitalizador por otra de extremo más agudo para acceder en las hendiduras que presentaba el modelo.

En la FIGURA 26 se muestra el modelo digital capturado de un florete de brócoli, el cual fue obtenido utilizando una punta de aguja extra fina que permitió acceder a todas aquellas irregularidades de la forma característica de este vegetal.



FIGURA 26. Modelo digital de florete de brócoli en modo esquelético.

En la FIGURA 27 se observa el mismo modelo en modo sombreado en la cual se aprecia que la cabeza del florete no es tan detallada; sin embargo, el grado de detalle logrado es exactamente el mismo que corresponde al modelo de yeso e ilustra claramente la forma asimétrica que lo describe.



FIGURA 27. Modelo digital de florete de brócoli en modo sombreado.

c) Camarones. Para este caso la digitalización no presentó mayor dificultad. En las FIGURAS 28 y 29 se observa el modelo digital capturado para un camarón. En la FIGURA 28 se ilustra su modo esquelético donde se observa claramente el método de digitalización utilizado, a su vez la FIGURA 29 corresponde al modelo sombreado, donde se obtuvo la forma asimétrica característica de este crustáceo.



FIGURA 28. Modelo de camarón digitalizado en modo esquelético.



FIGURA 29. Modelo de camarón digitalizado en modo sombreado.

d) Trozos de jurel envasados en bolsas esterilizables. Para este caso, como se ilustra en la FIGURA 30, se trazó una malla casi simétrica al modelo físico asentado sobre su base completamente lisa. Esto último permitió centrarse sólo en la parte anterior donde se pudo acceder sin mayores dificultades.



FIGURA 30. Modelo digital de trozos de jurel envasados en bolsas esterilizables en modo esquelético.

La FIGURA 31 se observa claramente el sellado al vacío que presentaba el modelo original donde se ven en detalle los trozos de jurel que contenía este envase.



FIGURA 31. Modelo digital de trozos de jurel envasados en bolsas esterilizables en modo sombreado.

4.2 Determinación de parámetros de tamaño y forma utilizando los modelos digitales de espárragos

Para esta sección se utilizó como material de prueba los turiones de espárragos. Gracias a la capacidad del software Rhinoceros® de evaluar el modelo digital es posible obtener parámetros de tamaño como por ejemplo área superficial, volumen, calibre, entre otros.

4.2.1 Validación del cálculo de las propiedades de los objetos. Algunas propiedades de los modelos físicos son fácilmente medibles en forma experimental, como por ejemplo volumen y calibre. Así, fue posible realizar una

comparación de los datos experimentales con los calculados por el software Rhinoceros®.

De los valores obtenidos en el presente trabajo (ANEXO 1), se utilizaron los parámetros de volumen y calibre tanto el experimental como el calculado. Dichos parámetros fueron sometidos a un análisis estadístico de comparación de medias, no encontrándose en ambos casos diferencia significativa para los métodos utilizados a un 95% de confianza.

Un resumen del porcentaje del error de predicción se muestra en el CUADRO 1, el cual indica una adecuada concordancia entre los valores calculados y experimentales.

CUADRO 1. Valores calculados y experimentales para volumen y diámetro de turiones de espárragos

Parámetros	N ^o	Porcentaje de error de predicción			
	muestras	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo
			estándar		
VOLUMEN	56	-1,62	1,93	3,02	-6,69
CALIBRE		-0,21	4,00	10,00	-7,14

Con lo anteriormente descrito se puede considerar que los modelos digitales capturados constituyen una representación adecuada del modelo físico evaluado.

4.2.2 Refinamiento de malla. En el CUADRO 2 se muestra la influencia de la resolución de malla sobre los valores del área superficial, volumen y calibre calculados con el software Rhinoceros®.

Mussira	Derémetres	Resolución de Malla			
widestra	Farametros	8x14	12x20	42x28	
1	Área (cm ²)	90,25	92,84	92,29	
	Volumen (cm ³)	35,85	38,38	38,25	
	Calibre (cm)	2,15	2,20	2,21	
2	Área (cm ²)	81,79	79,10	79,35	
	Volumen (cm ³)	28,71	27,51	27,61	
	Calibre (cm)	1,80	1,80	1,79	
3	Área (cm ²)	81,27	78,45	78,02	
	Volumen (cm ³)	29,99	28,87	28,46	
	Calibre (cm)	1,82	1,81	1,81	

CUADRO 2. Valores obtenidos a diferentes resoluciones de malla en tres muestras de espárragos.

Los resultados del diseño experimental mostraron que no existe diferencia estadísticamente significativa a un 95% de significancia en el factor de resolución de malla elegida con respecto a la respuesta en el diámetro, volumen y área superficial. Sin embargo, de acuerdo a lo descrito en la sección 4.1.1, para estudiar la forma geométrica de los alimentos, fue utilizada la máxima resolución para digitalizar los modelos físicos, ya que permite capturar el objeto con el máximo de detalles posible y obtener los parámetros de ingeniería con mayor precisión para aplicaciones posteriores. Así, si bien los resultados obtenidos sugieren que no existen diferencias significativas entre las tres resoluciones del mallado aplicado para las muestras de espárragos, es de suma importancia hacer notar que con alimentos de mayor complejidad, como el caso del brócoli y otros alimentos de geometría más irregular, esto podría no cumplirse debiéndose realizar un estudio más acabado sobre este tema en un próximo trabajo.

4.2.3 Ecuaciones predictivas. Una vez obtenido el modelo digital, es posible obtener diferentes parámetros de tamaño, con los cuales se podrían establecer ecuaciones predictivas. Para este análisis se utilizaron turiones de espárragos como material de estudio. Un objetivo del presente trabajo fue demostrar la

factibilidad de poder correlacionar el área superficial en función de parámetros fácilmente medibles como el peso o volumen y el calibre. Así, las ecuaciones resultantes fueron:

• En función del peso:

$$A_{\rm s} = 12,91C + 2,06P$$
; $R^2 = 0,9922$ (4.1)

• En función del volumen:

$$A_s = 13,15C + 2,07V \ ; R^2 = 0,9921$$
 (4.2)

donde:

- A_s : Área Superficial (cm²)
- C : Calibre (cm)
- P : Peso (g)
- V : Volumen (cm³)

En términos prácticos sería más fácil medir en terreno de manera rápida y exacta el peso que el volumen, por lo que se puede considerar que sería de mayor utilidad aquella ecuación que incluye el factor peso. En la FIGURA 32 se observa la relación que existe entre el área superficial y los valores de peso y volumen.

Otro objetivo fue correlacionar un descriptor de forma (SHDE) en función de los parámetros fácilmente medibles citados anteriormente. Así, se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

$$SHDE = 0,008P + 0,41C$$
; $R^2 = 0,9804$ (4.3)

SHDE =
$$0,42C + 0,0077V$$
; $R^2 = 0,9803$ (4.4)

SHDE =
$$0.52C$$
; $R^2 = 0.9795$ (4.5)

En la FIGURA 33 se observa la relación que existe entre el descriptor de forma con respecto a los valores de peso y volumen.



FIGURA 32. Efecto del peso y volumen sobre el área superficial.



FIGURA 33. Efecto del peso y volumen sobre el descriptor de forma.

4.3 Aplicaciones de los modelos digitales 3D

La captura y el estudio de la forma geométrica de los alimentos a través de digitalización 3D son de utilidad para hacer un posterior análisis como la simulación de procesos térmicos. También, a estos modelos 3D es posible someterlo a diferentes análisis de diseño.

4.3.1 Aplicaciones CAE (Computer Aided Engineering). Seguidamente se muestra una aplicación del software de simulación FEA ALGOR®, a los modelos digitales de alimentos. Estos modelos pueden ser sometidos a una simulación de transferencia de calor en estado transiente. En la FIGURA 34 se ilustra un ejemplo de la distribución de temperaturas para un tiempo determinado en el interior de un modelo digital de espárrago sometido a una simulación de un tratamiento térmico de escaldado.



FIGURA 34. Modelo 3D digital de espárrago en simulación de transferencia de calor.

FUENTE: FoodDigiCAELab (http://www.fooddigicaelab.uach.cl)

En la FIGURA 35 se ilustra un ejemplo de la distribución de temperaturas para un tiempo determinado en el interior de un modelo digital de brócoli sometido a una simulación de un tratamiento térmico de escaldado.



transferencia de calor.

En la FIGURA 36 se ilustra un ejemplo de la distribución de temperaturas para un tiempo determinado en el interior de un modelo digital de camarón sometido a una simulación de un tratamiento térmico de escaldado. Así como también en la FIGURA 37 se ilustra un ejemplo de la distribución de temperaturas para un tiempo determinado en el interior de un modelo digital de trozos de jurel en bolsa esterilizable sometida a una simulación de un tratamiento térmico de esterilización.

FUENTE: FoodDigiCAELab (http://www.fooddigicaelab.uach.cl)



transferencia de calor.



FIGURA 37. Modelo 3D digital de bolsa esterilizable en simulación de transferencia de calor.

FUENTE: FoodDigiCAELab (http://www.fooddigicaelab.uach.cl)
4.3.2 Otras aplicaciones. La metodología de ingeniería reversa abre un campo poco explorado en el área de la industria de alimentos donde se podrían realizar estudios de adecuación en el diseño de envases, entre muchas otras posibilidades que esta tecnología ofrece. Otra alternativa de aplicación para los modelos digitales constituye las visualizaciones fotorealísticas, como se ilustra en la FIGURA 38, donde se le incluye al modelo digital una textura de envase diseñada.



FIGURA 38. Modelo digital de trozos de jurel envasados en bolsas esterilizables con textura.

5. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos indican que es posible utilizar la digitalización 3D como una herramienta para obtener modelos geométricos digitales de alimentos de formas irregulares complejas para la determinación parámetros de ingeniería, simulación de procesos térmicos, entre otras potenciales aplicaciones.
- Para el caso de turiones de espárragos, desde el punto de vista práctico las ecuaciones obtenidas para área superficial y descriptor de forma fueron:
 A_s =12,91C + 2,06P (R² = 0,9922)
 SHDE = 0,008P + 0,41C (R² = 0,9804)
 Dichas ecuaciones, si bien cumplen el objetivo de señalar posibles aplicaciones del método, deberán ser validadas para evaluar su real magnitud sobre los cálculos realizados en terreno en un siguiente trabajo.
- Por su versatilidad de formato y tamaño de archivo, los modelos 3D obtenidos cumplen los requisitos básicos para ser almacenados en bibliotecas digitales tridimensionales, herramienta útil para intercambiar opiniones y realizar ensayos en conjuntos con la comunidad académica nacional e internacional que estudia la forma geométrica de los alimentos.

6. RESUMEN

El conocimiento de ciertos parámetros de tamaño (área superficial, volumen, calibre, largo, entre otros) y forma (obtenidos por combinación de ellos) es importante en el diseño y evaluación de equipos y procesos. El objetivo de la presente investigación fue implementar una metodología basada en la ingeniería reversa para capturar digitalmente la forma irregular compleja de alimentos. Los productos evaluados fueron turiones de espárragos, floretes de brócoli, camarones y trozos de jurel envasados en bolsas esterilizables. Debido a la naturaleza perecedera de algunos de estos alimentos, se obtuvieron réplicas de yeso mediante técnicas de obtención de prótesis dentales. La reconstrucción de la superficie y forma de los alimentos evaluados fue realizada mediante un sistema de digitalización 3D conformado por un brazo mecánico de precisión (Microscribe 3DL) y un software modelador de superficies NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) (Rhinoceros 3.0). El método consistió en trazar una malla sobre la superficie del modelo físico, luego capturar los puntos (x,y,z)de las intersecciones de la malla con el brazo digitalizador, para posteriormente generar el modelo digital 3D. Para el caso de turiones de espárragos, se determinaron las propiedades de forma y tamaño, utilizando las funciones de análisis del software, así como los valores del descriptor de forma, este último definido como "la razón entre el volumen del producto comparado con el volumen de un cilindro infinito de la misma área superficial". Con estos datos se obtuvieron ecuaciones predictivas para estimar el área superficial y el descriptor de forma en base al calibre, peso y/o volumen. Los resultados obtenidos sugieren que es posible utilizar la digitalización 3D como herramienta para obtener modelos geométricos de alimentos de formas irregulares complejas. Esto permitiría, entre otras ventajas, un posterior análisis para la determinación de diversos parámetros de ingeniería y simulación de procesos térmicos.

63

SUMMARY

The knowledge of certain parameters of size (surface area, volume, gauge, length, among others) and shape (obtained by combination of them) is important in the design and evaluation of equipment and processes. The objective of the present research was to implement a methodology based on reverse engineering principles to capture by digitizing the geometry of irregular-shaped foods. The evaluated products were asparagus spears, broccoli florets, shrimps and retortable pouches of Jack mackerel pieces. Due to the perishable nature of some of these foods, plaster replicas were obtained by using dental technology. The reconstruction of the surface and shape of evaluated foods was made by means of a 3D digitizing system formed by a precision mechanical arm (Microscribe 3DL) and a modeling software of NURBS surfaces (Non-Uniform Rational B-Spline) (Rhinoceros 3.0). The method consisted of drawing up a mesh on the surface of the physical model, then capturing points (x, y, z) from the intersections of the mesh with the digitizer arm, and afterwards generating the 3D digital model. For the case of asparagus spears, shape and size properties were determined using the analysis functions of software, as well as the values of shape descriptor, defined as "the ratio between the volume of the food product compared with the volume of an infinite cylinder of the same surface area". With these data, predictive equations were obtained to estimate the surface area and the shape descriptor based on the gauge, weight and/or volume. The obtained results suggest it is possible to use the 3D digitizing as a tool to obtain geometric food models of complex irregular shapes. This would allow, among other advantages, a later analysis for the determination of several engineering parameters and simulation of thermal processes.

7. BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, L., GAMEIRO, S., MADEIRA, J. y TEIXERA, J. 2000. Shoelat 3D –
 Sistema para Modelaçao de Formas para Calçado. Trabajo del Centro de
 Computação Gráfica. Coimbra. Portugal. Available in
 http://www.ccg.pt/Publications/Communications/Communication_2000.asp
 (Accessed at 14/10/2003)
- ARNOLD, F. 2000. MACAO A Journey into CAx Interoperability and Collaborative Design. In Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Information Visualisation, Collaborative Design Visualisation Session, London, England. pp. 557-562. Available in http://sumatra.mv.uni-kl.de/publikationen/ (Accessed at 15/01/2004)
- BORDEGONI, M. y FILIPPI, S. 2001. Reverse Engineering for Molding. Available in http://www.kaemart.it/html/publications.php (Accessed at 14/11/2003)
- BOSINCO, P., DURAND, G., GOUSSARD, J., LIEUTER, A. y MASSABO, A.
 1998. Complex Shape modifications. 2nd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering (IDMME98). UTC, COMPIEGNE, FRANCE. Available in http://rkk.mv.uni-kl.de/FIORES/publication.html (Accessed at 10/11/2003)
- CHEN, J. 1996. Computational Geometry: Methods and Applications. Computer Science Department. Texas A&M University. 227 pp. Available in http://faculty.cs.tamu.edu/chen/ (Accessed at 15/11/2003)

65

- CLAYTON, M., AMOS, N., BANKS, N. y MORTON, R. 1995. Estimation of apple fruit surface area. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science 23: 345-349.
- CLELAND, D., CLELAND, A. y EARLE, R. 1987a. Prediction of freezing and thawing times for multi-dimensional shapes by simple formulae, Part 1: regular shapes. International Journal of Refrigeration 10: 156-164.
- CLELAND, D., CLELAND, A. y EARLE, R. 1987b. Prediction of freezing and thawing times for multi-dimensional shapes by simple formulae, Part 2: irregular shapes. International Journal of Refrigeration 10: 234-240.
- CODEX STAN 225-2001. 2001. Codex standard for asparagus. Codex Alimentarius. FAO/OMS.
- DATTA, A. 1998. Computer-Aided Engineering in Food Process and Product Design. Food Technology 52(10): 44-52.
- DEWULF, W., JANCSOK, P., NICOLAI, B., DE ROECK, G. y BRIASSOULIS, D. 1999. Determining the Firmness of a Pear using Finite Element Modal Análisis. Journal of Agricultural Engineering Research 74(3): 217-224.
- DIMAS, E. y BRIASSOULIS, D. 1999. 3D geometric modelling based on NURBS: a review. Advances in Engineering Software 30: 741-751.
- FORBES, K. 2000. Volume Estimation of Fruit from Digital Profile Images. Master's thesis, University of Cape Town. South Africa.

- HAIR, J., ADERSON, R., TATHAM, R. y BLACK, W. 1999. Análisis de regression multiple. In: Análisis Multivariante. Prentice Hall. New Jersey. pp 143-226.
- HAHN, F. y SANCHEZ, S. 2000. Carrot Volume Evaluation using Imaging Algorithms. Journal of Agricultural Engineering Research.75(3): 243-249.
- KAGAN, P. y FISCHER, A. 2000. Integrated mechanically based CAE system using B-Spline finite elements. Computer-Aided Design 32: 539-552.
- KEMOCHI, Y. y KLETTE, R. 2000. Surface area estimation for digitized regular solids. Computer Science Department of the University Auckland. Available in http://www.citr.auckland.ac.nz/techreports/ ?year=2000 (Accessed at 15/01/2004)
- KLETTE, R. 2001. Digital Geometry. The birth of a new discipline. Computer Science Department of the University Auckland. Available in http://www.citr.auckland.ac.nz/techreports/?year=2001 (Accessed at 15/01/2004)
- LAN, Y. y FANG, Q. 2003. Physical Properties of Agricultural Products. In: Enciclopedia of Agricultural, Food and Biological Engineering. Marcel Dekker Inc. New York. pp. 150-163.
- Li, L., SCHEMENAUER, N., PENG, X., ZENG, Y. y GU, P. 2002. A reverse engineering system for rapid manufacturing of complex objets. Robotics and Computer Integrated Manufacturing 18: 53-67.
- MACIVER, M. y NELSON, M. 2000. Body modeling and model-based tracking for neuroethology. Journal of Neuroscience Methods 95: 133-143.

- MATA, M., VINACUA, A. y BRUNET, P. 1999. Inclusión de métodos de ingeniería inversa en sistemas CAS/CAD para la optimización del proceso de diseño de productos. Available in http://sumatra.mv.unikl.de/FIORES/Dissemination/FIORES_WebPage/publications.htm (Accessed at 15/01/2004)
- NARUSHIN, V. 2001. Shape geometry of the avian egg. Journal of Agricultural Engineering Research 79: 441-448.
- NIELSON, G. 2000. Volume Modelling. In: M. Chen et al. (eds.). Volume Graphics, Springer, 2000; 29-48. Volume Graphics, M. Chen, A. Kaufman and R. Yagel (eds.), Springer. pp. 29-50.
- NORTON, J., DONALDSON, N. y DEKKER, L. 2002. 3D whole body scanning to determine mass properties of legs. Journal of Biomechanics 35: 81-82.
- PACIORNIK, S. 2001. Introdução ao Processamento Digital de Imagens. MET2431. Curso de pós-graduação oferecido pelo Laboratório de Processamento Digital de Imagens. Depto. De Ciencia dos Materiais e Metalurgia. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Available in http://www.dcmm.puc-rio.br/lpdi/ (Accessed at 15/11/2003)
- PHAM, Q. 1991. Shape factors for the freezing time of ellipses and ellipsoids. Journal of Food Engineering 13: 159-170.
- PIEGL, L. 1991. On NURBS: A Survey. IEEE Computer Graphics and applications 11(1): 55-71.

- RAZDAN, A., STEINBERG, B. y FARIN G. 1998. From Digitized Data to NURB Surface Meshes. In Proceedings of the International Conference of Rapid Prototyping and Manufacturing, pp 749-754, Beijing, China. Available in http://prism.asu.edu/publications.html (Accessed at 14/02/2004)
- RHINOCEROS. 2002. NURBS modeling for Windows. User's Guide Version 3.0. Robert McNeel & Associates. USA.
- RUIZ, O. 2000. DigitLAB, an Environment and Language for Manipulation of 3D Digitizations. International Conference on Integrated Design and Manufacturing (IDMME'2000) & Canadian Society of Mechanical Engineering FORUM. Available in http://www.eafit.edu.co/EafitCn/ investigacion/grupos/ingenieria/laboratorioCAD/publicaciones/ponencias. shtm (Accessed at 11/10/2003)
- RUIZ, O. y CAMACHO, J. 2000. Surface Reconstruction Algorithms for Anthropometric Modeling, III National Meeting on Ergonomics. Available in http://www.eafit.edu.co/EafitCn/investigacion/grupos/ ingenieria/laboratorioCAD/publicaciones/ponencias.shtm (Accessed at 11/10/2003)
- SABLIOV, C., BOLDOR, D., KEENER, K., y FARKAS, B. 2002. Image Processing Method to Determine Surface Area and Volume of Axi-Symmetric Agricultural Products. International Journal of Food Properties. 5(3): 641 - 653.
- SMITH, R., NELSON, G. y HENRICKSON, R. 1967. Analyses on transient heat transfer from anomalous shapes. Transactions of the ASAE 10: 236-245.

- SMITH, R., NELSON, G. y HENRICKSON, R. 1968. Aplications of geometry analysis of anomalous shapes to problems in transient heat transfer. Transactions of the ASAE 11: 296-302.
- STEINBERG, B., RAZDAN, A. y FARIN, G. 1998. Reverse Engineering Trimmed NURB Surfaces From Laser Scanned Data. In The Solid Freeform Fabrication Conference, pp 277-284, Austin, Texas. Available in http://prism.asu.edu/publications.html (Accessed at 14/02/2004)
- VÁRADY, T., MARTIN, R. y COX, J. 1997. Reverse Engineering of Geometric Models – An Introduction. Computer-Aided Design 29(4): 255-269.
- WILHITE, R. 2003. Digitizing Large Fosil Skeletal Elements for Three-Dimensional Applications. Paleontología Electrónica 5(1):10pp.
- WILSON, J. 2001. An Introduction to Rhino. CADALYST Magazine. Available in http://cadence.advanstar.com/2001/1201/thirddimension1201.html (Accessed at 14/04/2004)
- ZÚÑIGA, G. 2000. Validación experimental y evaluación de un modelo de diferencias finitas utilizado para describir el proceso combinado escaldado-hidroenfriado de alimentos de formas regulares. Tesis para optar al grado de Licenciado en Ingeniería en Alimentos. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. 188p.

ANEXOS

ANEXO 1.

Parámetros experimentales y calculados para turiones de espárragos.

Fenárrago	ÁREA SUPERFICIAL	PESO		VOLUMEN (cm	3)	CALIBRE (cm)		
Lsparrago	(cm²)	(g)	Calculado	Experimental	Error (%)	Calculado	Experimental	Error (%)
1	79,67	28,84	28,8	29,1	-0,95	1,96	1,89	3,63
2	82,50	31,31	31,2	31,4	-0,73	2,30	2,28	0,99
3	70,02	22,74	22,1	22,2	-0,65	1,80	1,71	5,42
4	77,85	27,59	27,3	27,5	-0,91	1,99	2,07	-3,85
5	86,93	35,68	35,2	35,6	-1,18	2,33	2,26	3,24
6	76,58	25,62	25,3	25,4	-0,55	1,67	1,73	-3,32
7	74,09	26,37	26,0	26,2	-0,85	2,11	2,08	1,45
8	73,78	26,61	25,2	25,7	-2,12	1,87	1,85	1,02
9	77,78	27,12	26,7	27,3	-2,12	1,92	1,89	1,43
10	72,08	22,96	22,1	22,4	-1,28	1,81	1,85	-1,94
11	65,04	20,54	19,4	19,2	1,07	1,57	1,63	-3,59
12	76,71	25,72	25,6	26,3	-2,62	1,85	1,79	3,49
13	73,12	23,60	23,6	24,1	-2,22	1,57	1,62	-3,38
14	63,83	20,04	19,3	20,2	-4,44	1,80	1,83	-1,75
15	78,94	29,90	29,8	29,5	0,93	1,91	1,98	-3,33
16	67,02	20,82	20,0	20,2	-0,85	1,63	1,58	2,86
17	82,24	28,99	29,0	29,1	-0,33	2,41	2,33	3,25
18	67,37	21,03	20,7	20,5	0,82	1,77	1,72	2,80
19	73,97	23,78	23,4	24,1	-2,97	1,68	1,74	-3,26
20	71,74	21,74	21,4	22,1	-3,35	1,61	1,68	-4,29
21	80,01	26,03	25,5	26,6	-4,16	2,02	1,96	3,00

ANEXO 1. (continuación)

Parámetros experimentales y calculados para turiones de espárragos.

Ecnárrago	Espárrago ÁREA SUPERFICIAL PESO			VOLUMEN (cm	³)	CALIBRE (cm)		
Esparrago	(cm²)	(g)	Calculado	Experimental	Error (%)	Calculado	Experimental	Error (%)
22	69,78	21,84	21,5	22,2	-3,32	1,62	1,72	-5,58
23	67,20	20,12	19,7	20,2	-2,26	1,41	1,48	-4,83
24	65,75	19,87	19,6	20,1	-2,54	1,94	1,87	3,77
25	68,96	21,05	20,9	21,2	-1,36	1,67	1,65	1,10
26	61,83	17,65	17,5	18,5	-5,25	1,52	1,47	3,63
27	61,61	16,74	16,6	16,6	0,21	1,67	1,64	1,98
28	59,78	16,24	16,2	16,3	-0,79	1,53	1,45	5,19
29	58,96	15,74	15,7	16,8	-6,69	1,44	1,52	-4,94
30	70,00	22,22	22,1	22,3	-0,91	1,97	1,89	4,06
31	73,07	22,95	22,9	22,5	1,63	1,52	1,58	-3,95
32	71,62	23,46	23,2	24,2	-4,07	1,64	1,66	-1,13
33	65,32	20,07	19,8	20,1	-1,40	1,89	1,92	-1,56
34	69,07	22,06	22,0	22,2	-1,01	1,66	1,7	-2,55
35	80,62	28,13	28,1	28,7	-2,21	2,38	2,37	0,26
36	66,37	18,78	18,6	18,9	-1,37	1,59	1,63	-2,72
37	63,65	17,65	17,6	18,3	-3,71	1,55	1,58	-2,11
38	77,81	23,45	23,3	24,2	-3,86	1,40	1,38	1,60
39	70,95	20,65	20,5	20,6	-0,28	1,44	1,46	-1,46
40	68,32	19,34	19,3	18,7	3,02	1,39	1,47	-5,47
41	62,91	17,02	16,8	16,9	-0,43	1,32	1,33	-0,65
42	75,76	22,38	22,3	22,5	-0,81	1,61	1,66	-2,74

ANEXO 1	. (continu	uación)
---------	------------	---------

Parámetros experimentales y calculados para turiones de espárragos.

Ecnárrago	ÁREA SUPERFICIAL	PESO		VOLUMEN (cm	³)	CALIBRE (cm)		
Esparrago	(cm²)	(g)	Calculado	Experimental	Error (%)	Calculado	Experimental	Error (%)
43	69,42	21,25	21,1	20,9	1,11	1,72	1,68	2,12
44	80,09	28,12	27,8	28,2	-1,43	1,87	1,89	-0,81
45	69,25	22,64	22,5	22,3	0,92	2,78	2,85	-2,46
46	71,76	23,02	22,9	22,7	0,95	1,67	1,59	5,03
47	71,88	23,74	23,7	24,2	-2,12	1,88	1,72	9,33
48	76,69	27,02	27,0	28,1	-4,06	1,89	1,85	2,01
49	80,61	29,50	29,4	30,2	-2,56	2,04	1,91	6,63
50	81,03	30,53	30,4	30,6	-0,65	2,09	2,12	-1,36
51	69,91	22,31	22,3	22,3	-0,03	1,91	2,06	-7,14
52	58,50	16,13	16,0	16,9	-5,33	1,74	1,85	-6,15
53	69,22	21,33	21,2	22,2	-4,36	1,75	1,79	-2,23
54	70,12	20,37	20,3	20,5	-1,19	1,52	1,63	-6,58
55	65,45	17,36	17,4	18,1	-3,86	1,71	1,55	10,00
56	80,62	28,12	28,1	28,5	-1,52	1,63	1,73	-5,78

ANEXO 2

Parámetros y descriptores de forma para turiones de espárragos.

_ /	Longitud	ÁREA	VOLUMEN	DES	CRIPTOR DE	FORMA
Esparrago	(cm)	SUPERFICIAL (cm ²)	(cm³)	Deq	V'	SHDE
1	17	79,67	28,8	1,49	29,72	0,97
2	17	82,50	31,2	1,55	31,88	0,98
3	17	70,02	22,1	1,31	22,96	0,96
4	17	77,85	27,3	1,46	28,39	0,96
5	17	86,93	35,2	1,63	35,39	0,99
6	17	76,58	25,3	1,43	27,47	0,92
7	17	74,09	26,0	1,39	25,71	1,01
8	17	73,78	25,2	1,38	25,50	0,99
9	17	77,78	26,7	1,46	28,34	0,94
10	17	72,08	22,1	1,35	24,33	0,91
11	17	65,04	19,4	1,22	19,81	0,98
12	17	76,71	25,6	1,44	27,56	0,93
13	17	73,12	23,6	1,37	25,04	0,94
14	17	63,83	19,3	1,20	19,08	1,01
15	17	78,94	29,8	1,48	29,18	1,02
16	17	67,02	20,0	1,26	21,04	0,95
17	17	82,24	29,0	1,54	31,68	0,92
18	17	67,37	20,7	1,26	21,26	0,97
19	17	73,97	23,4	1,39	25,63	0,91
20	17	71,74	21,4	1,34	24,11	0,89
21	17	80,01	25,5	1,50	29,98	0,85
22	17	69,78	21,5	1,31	22,80	0,94
23	17	67,20	19,7	1,26	21,15	0,93
24	17	65,75	19,6	1,23	20,24	0,97
25	17	68,96	20,9	1,29	22,27	0,94
26	17	61,83	17,5	1,16	17,90	0,98
27	17	61,61	16,6	1,15	17,78	0,94
28	17	59,78	16,2	1,12	16,74	0,97
29	17	58,96	15,7	1,10	16,28	0,96
30	17	70,00	22,1	1,31	22,95	0,96
31	17	73,07	22,9	1,37	25,00	0,91
32	17	71,62	23,2	1,34	24,02	0,97
33	17	65,32	19,8	1,22	19,98	0,99
34	17	69,07	22,0	1,29	22,34	0,98
35	17	80,62	28,1	1,51	30,44	0,92

ANEXO 2. (continuación)

	Longitud	ÁREA	VOLUMEN	DES	CRIPTOR DE	FORMA
Espárrago	(cm)	SUPERFICIAL (cm ²)	(cm³)	Deq	V'	SHDE
36	17	66,37	18,6	1,24	20,63	0,90
37	17	63,65	17,6	1,19	18,98	0,93
38	17	77,81	23,3	1,46	28,36	0,82
39	17	70,95	20,5	1,33	23,57	0,87
40	17	68,32	19.3	1.28	21.85	0.88
41	17	62,91	16,8	1,18	18,54	0,91
42	17	75,76	22,3	1,42	26,88	0,83
43	17	69,42	21,1	1,30	22,57	0,94
44	17	80,09	27,8	1,50	30,04	0,93
45	17	69,25	22,5	1,30	22,46	1,00
46	17	71,76	22,9	1,34	24,12	0,95
47	17	71,88	23,7	1,35	24,20	0,98
48	17	76,69	27,0	1,44	27,54	0,98
49	17	80,61	29,4	1,51	30,43	0,97
50	17	81,03	30,4	1,52	30,75	0,99
51	17	69,91	22,3	1,31	22,89	0,97
52	17	58,50	16,0	1,10	16,03	1,00
53	17	69,22	21,2	1,30	22,44	0,95
54	17	70,12	20,3	1,31	23,03	0,88
55	17	65,45	17,4	1,23	20,06	0,87
56	17	80,62	28,1	1,51	30,44	0,92

Parámetros y descriptores de forma para turiones de espárragos.

ANEXO 3

Método de digitalización con MicroScribe[™] en Rhinoceros®:

Generación de superficies a partir de una malla de puntos

Sistema de digitalización 3D conformado por el brazo mecánico de precisión Microscribe 3DL (Immersion Co., San José, CA) y el software modelador de superficies NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) Rhinoceros 3.0 SR3c (Robert McNeel & Associates, Seattle, WA).

Procedimiento:

1. Para este método se requiere definir los puntos, que indicaran las coordenadas (*x*, *y*, *z*), en el modelo físico. Para ello se debe trazar una malla que cubra toda la superficie del objeto. La distancia entre los puntos de la malla debe ser el necesario para capturar adecuadamente la forma y, en aquellas secciones del objeto físico que presenten mayor irregularidad, el tamaño de malla debe ser lo más fina posible. Por ejemplo, para el caso de los turiones de espárragos y bolsas esterilizables la distancia entre los puntos de malla trazados fueron aproximadamente de 0,3 cm y 0,5 cm como mínimo, respectivamente, en aquellas secciones que presentaron mayor irregularidad. Para las otras secciones regulares del objeto, una distancia de 0,8 a 1.0 cm entre los puntos sería apropiado.

El trazado de malla debe realizarse como se describe en la sección 3.3.2.1.

 Colocar y estabilizar el modelo físico sobre una plataforma que permita ser accesado por completo por el brazo digitalizador. Se recomienda encontrar la orientación más estable e implementar un sistema de soporte para cada modelo físico, de manera que este quede firme y rígido al ser tocado con el brazo digitalizador.

La disposición del modelo físico, brazo y computador debe ser como se muestra en las FIGURAS 11 y 17.

 Establecer las unidades de medida deseadas para la captura de datos y generación del modelo digital. Para este efecto, ir al Menú TOOLS, seleccionar OPTIONS y configurar las unidades a la que se desee trabajar.

Tools Dimension Analyze Rhino Options	,
Object Snap 🔹	-
Polygon Mesh 🕨 🕞 Document Properties	
Polygon Mesh Primitives 🕨 🚽 TreeFrog	Units and tolerances
3-D Digitizer 🕨 Mesh	
Commands • Units	Model <u>u</u> nits:
BbinoScript	Absolute tolerance: 0.01 units
Grid	
Toolbar Layout	<u>R</u> elative tolerance: 1.0 percent
Plug-in Manager Summary	Angle tolerance: 3.0 degrees
License Manager	
Options View	Custom units
	Name: Units
Aliases	Unite nor mater: 1.0
Appearance	unis per <u>m</u> eter.
Colors	Distance display
Files	Decimal
- Leneral	O <u>F</u> ractional
Keyboard	C Feet & Inches
Displau	Direlau presision: 1 000
- OpenGL	Display precision.
Modeling Aids	
Bongo	
RhinoScript	

 Conectar el digitalizador MicroScribe al software Rhinoceros.
 Ir al menú TOOLS, seleccionar 3-D DIGITIZER > CONNECT de la barra menú principal,

ools	Dimension	Analyze		
Obj Poly Poly	ect Snap /gon Mesh /gon Mesh Pr	imitives		
3-D	Digitizer		•	Connect
Commands RhinoScript		1))	Disconnect
Too Plue	Toolbar Layout			Set Scale Pause
License Manager		r,	•	Sketch Curve
		Planar Section Cur		

o presionar el icono del digitalizador



luego, cuando le solicite seleccionar el digitalizador introduzca el nombre del digitalizador Microscribe:

5. Inicialización/Calibración del digitalizador MicroScribe.

Para introducir el origen de coordenadas (0,0,0) con el digitalizador, utilice el brazo para seleccionar un origen real previamente establecido y marcado sobre la superficie de la plataforma. Para esto, la aguja del digitalizador se localiza en el punto seleccionado y se presiona el botón distal del *Hand Switch* o el pedal derecho del *Foot Switch* para capturar el punto origen. Luego, se deben establecer los ejes X e Y en la superficie de trabajo con el digitalizador.

Cuando Rhino le solicite introducir el eje X con el digitalizador, utilice el brazo para seleccionar un eje X real. Esto se logra teniendo activado el *prompt* del digitalizador y localizando la punta del brazo en la dirección que se desee sea el eje X positivo. Presionar el botón distal del *Hand Switch* o el pedal derecho del *Foot Switch* para capturar el punto.

Para el caso del eje Y positivo se sigue el mismo procedimiento descrito para el eje X, seleccionando otra dirección sobre el área de trabajo. No es necesario asegurarse de que el eje Y sea perpendicular al eje X, ya que Rhino se encargará de hacerlo.

Establecimiento del origen en Rhino. Presionar ENTER para usar el sistema de coordenadas universales. También, en forma opcional se puede escoger un origen.

 Seleccionar el método de captura de datos, en este caso, Rejilla o Malla de Puntos. Para este efecto, ir al menú SURFACE y seleccionar la opción POINT GRID.



Rhino le solicitará definir el tamaño de la malla o rejilla de puntos (número de filas y columnas) para la generación de la superficie, de la siguiente forma:

Number of points in row <3> (Closed=No Degree=2 KeepPoints=No):

Ingresar el número total de filas que forman el mallado (matriz) del modelo físico.

Number of points in column <3> (<u>Closed=No</u> <u>Degree=2</u> <u>KeepPoints=No</u>): Ingresar el número total de columnas que forman el mallado (matriz) del modelo físico.

El digitalizador y Rhino están listos ahora para capturar las coordenadas de los puntos del modelo físico. Es importante no mover el modelo físico o la base del digitalizador durante la digitalización (exploración y de comprobación de acceso).

 Inmediatamente Rhino requerirá ingresar, en forma secuencial y en forma de una matriz, las coordenadas de los puntos correspondientes a la malla trazada sobre el modelo físico.

Las coordenadas (x, y, z) se ingresan localizando la punta del digitalizador sobre cada punto de las intersecciones de la malla. La digitalización se realiza hasta capturar todos los puntos de la malla, obteniendo una nube de puntos. Al capturar la coordenada del último punto, Rhino genera automáticamente una superficie a partir de la nube de puntos

ANEXO 4

Método de digitalización con MicroScribe[™] en Rhinoceros®: Generación de superficies a partir de curvas de puntos interpolados

Sistema de digitalización 3D conformado por el brazo mecánico de precisión Microscribe 3DL (Immersion Co., San José, CA) y el software modelador de superficies NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) Rhinoceros 3.0 SR3c (Robert McNeel & Associates, Seattle, WA).

Procedimiento:

1. Para este método se requiere definir los puntos, que indicaran las coordenadas (x, y, z), en el modelo físico. Para ello se debe trazar una malla que cubra toda la superficie del objeto. La distancia entre los puntos de la malla debe ser el necesario para capturar adecuadamente la forma y, en aquellas secciones del objeto físico que presenten mayor irregularidad, el tamaño de malla debe ser lo más fina posible. Por ejemplo, para el caso de los camarones (gambas) y floretes de brocóli la distancia entre los puntos de malla trazados fueron aproximadamente de 0,3 cm como mínimo en aquellas secciones regulares del objeto, una distancia de 0,8 a 1.0 cm entre los puntos sería apropiado.

El trazado de malla debe realizarse como se describe en la sección 3.3.2.1.

2. Colocar y estabilizar el modelo físico sobre una plataforma que permita ser accesado por completo por el brazo digitalizador. Se recomienda encontrar la orientación más estable e implementar un sistema de soporte para cada modelo físico, de manera que este quede firme y rígido al ser tocado con el brazo digitalizador.

La disposición del modelo físico, brazo y computador debe ser como se muestra en la FIGURA 17.

 Establecer las unidades de medida deseadas para la captura de datos y generación del modelo digital. Para este efecto, ir al Menú TOOLS, seleccionar OPTIONS y configurar las unidades a la que se desee trabajar.

Tools Dimension Analyze	😽 Rhino Options			>
Object Snap 🔹 🕨				
Polygon Mesh 🔹 🕨	⊡- Document Properties			
Polygon Mesh Primitives 🕨	TreeFrog	Units and tolerances –		
3-D Digitizer 🕨 🕨	- Mesh			
Commands	Units	Model <u>u</u> nits:	Centimeters	
PhipoScript	Dimensions	Absolute tolerance:	0.01 units	
	Grid	Absolute joierance.	units	
Toolbar Layout	Notes	<u>R</u> elative tolerance:	1.0 percent	
Plug-in Manager	Bongo	Angle tolerance:	3.0 degrees	
License Manager 🔹 🕨	Bhing Options		love george	
Options	View	Custom units		
	- SpaceBall	<u>N</u> ame:	Units	
	- Aliases	Lipits per meter:	1.0	
	- Appearance	onite per <u>m</u> eter.	1.0	
	Colors	Distance display		
	- Files	Decimal		
	Mourse	C <u>F</u> ractional		
		C Feet & Inches		
	Display	Displau precision:	1.000	
	OpenGL	Dispidy pr <u>o</u> cision.	11.000	
	- Modeling Aids			
	Bongo			
	- RhinoScript			
			ΟΚ	Cancel Help

 Conectar el digitalizador MicroScribe al software Rhinoceros.
 Ir al menú TOOLS, seleccionar 3-D DIGITIZER > CONNECT de la barra menú principal,

ools	Dimension	Analyze		
Obj Poly Poly	ect Snap /gon Mesh /gon Mesh Pr	imitives		
3-D	Digitizer		•	Connect
Commands RhinoScript		1))	Disconnect
Too Plue	Toolbar Layout			Set Scale Pause
License Manager		r,	•	Sketch Curve
		Planar Section Cur		

o presionar el icono del digitalizador



luego, cuando le solicite seleccionar el digitalizador introduzca el nombre del digitalizador Microscribe:

5. Inicialización/Calibración del digitalizador MicroScribe.

Para introducir el origen de coordenadas (0,0,0) con el digitalizador, utilice el brazo para seleccionar un origen real previamente establecido y marcado sobre la superficie de la plataforma. Para esto, la aguja del digitalizador se localiza en el punto seleccionado y se presiona el botón distal del *Hand Switch* o el pedal derecho del *Foot Switch* para capturar el punto origen. Luego, se deben establecer los ejes X e Y en la superficie de trabajo con el digitalizador.

Cuando Rhino le solicite introducir el eje X con el digitalizador, utilice el brazo para seleccionar un eje X real. Esto se logra teniendo activado el *prompt* del digitalizador y localizando la punta del brazo en la dirección que se desee sea el eje X positivo. Presionar el botón distal del *Hand Switch* o el pedal derecho del *Foot Switch* para capturar el punto.

Para el caso del eje Y positivo se sigue el mismo procedimiento descrito para el eje X, seleccionando otra dirección sobre el área de trabajo. No es necesario asegurarse de que el eje Y sea perpendicular al eje X, ya que Rhino se encargará de hacerlo.

Establecimiento del origen en Rhino. Presionar ENTER para usar el sistema de coordenadas universales. También, en forma opcional se puede escoger un origen.

6. Seleccionar el método de captura de datos, en este caso, Puntos Interpolados. Para este efecto, seleccionar de la barra de herramientas 3D-DIGITIZING la opción elaborar una curva a partir de puntos interpolados (INTERPOLATE POINTS).



Rhino le solicitará ingresar el punto de inicio de la curva (START OF CURVE). Para esto, la aguja del digitalizador se localiza en un punto de la malla del modelo físico y se presiona el botón distal del *Hand Switch* o el pedal derecho del *Foot Switch* para capturar las coordenadas (x, y, z) de dicho punto.

Luego, Rhino solicita el ingreso de los siguientes puntos (NEXT POINT). De esta forma se capturan las coordenadas de los puntos que conforman cada una de las columnas o filas de la malla. Esto se realiza sucesivamente hasta obtener todas las filas o columnas del modelo físico formando curvas cerradas o abiertas. Por ejemplo, para el caso de camarones, de la malla trazada se capturaron los puntos de cada fila en forma completa formando una curva cerrada (ver FIGURA 28); para el caso de floretes de brocóli se capturaron los puntos que conformaban cada columna de la malla trazada sobre el modelo físico formando curvas abiertas (Ver FIGURA 26).

7. Una vez obtenida todas las columnas o filas, formando curvas abiertas o cerradas, se hace pasar una superficie de acomodación o ajuste por todas las curvas. Para ello seleccionamos todas las curvas capturadas y elegimos SURFACE y la opción LOFT del menú de herramientas.

	😵 Loft Options 🛛 🔀
	<u>S</u> tyle
Surface Solid Transform	Normal 🔹
Plane 🕨	Closed loft
Loft	Match start tangent
Sweep 1 Rail	Match end tangent
Sweep 2 Rails	
Revolve	Cross-section curve options
Rail Revolve	Do not simplify
Curve Network	C <u>R</u> ebuild with 10 control points
Corner Points	C Refit within 0.001 millimeters
Edge Curves	
Planar Curves	OK Cancel Preview Help
Point Grid	

La opción LOFT nos ajusta una superficie que pasa por todas aquellas curvas capturadas, con esto obtenemos el modelo digital final.