



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS FÍSICAS

**MORFOMETRÍA FACIAL EN POBLACIONES SANAS MEDIANTE UN SISTEMA
DE ESTEREOVISIÓN**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS (FÍSICA MÉDICA)

PRESENTA:
LETICIA DEL PILAR LÓPEZ TABARES

TUTOR PRINCIPAL:
DR. JORGE ALBERTO MÁRQUEZ FLORES, CCADET-UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:
DR. FERNANDO ALEJANDRO BARRIOS ÁLVAREZ, INB-UNAM
DR. LUIS BENÍTEZ BRIBIESCA, POSGRADO EN CIENCIAS FÍSICAS
DRA. LILIA LORENA ESCORCIA HERNÁNDEZ, IIA-UNAM

MÉXICO, D. F. ENERO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres

“Think, believe, dream and dare.”

Walt Disney



Agradecimientos

A mi papá y mi mamá por su apoyo y cariño, sin ellos no podría ser la persona que soy ahora y cumplir este objetivo.

A mi papá por ayudarme a salir adelante y saber que siempre podré contar con él, por darme la oportunidad de ver más allá y enseñarme a ser perseverante.

A mi mamá por sus cuidados y sus consejos que me han acompañado siempre y además puedo contar con ella como mi mejor amiga.

A mi hermano por todos los buenos momentos que hemos pasado juntos y por ver en él a una persona llena de fortaleza.

A mis abuelos por compartir sus lecciones de vida conmigo y enseñarme a perseguir los sueños.

A mis tíos, tías y primos, por su cariño, compañía y enseñanzas.

A mis amigos Diego y Ricardo por tener un momento para escucharme y todos los momentos compartidos.

A mi amigo y compañero Iván que compartió conmigo todo este proceso y lo hizo más ameno.

A la UNAM por permitirme llevar a cabo mis estudios bajo su techo.

A mi tutor el Dr. Márquez por creer en mí para poder desarrollar este proyecto y los conocimientos otorgados.

Al Dr. Gastelum por la ayuda, paciencia y aprendizaje que me dejó.

A mi comité tutor y sinodales por los consejos y aportaciones dadas.

A la Dra. Brandan por confiar en mí para darme la oportunidad de estudiar en este programa.

A todos mis profesores de la maestría por sus enseñanzas.

A todos los sujetos que se prestaron a participar en este estudio, sin ellos jamás hubiera podido concluir este trabajo.

Al CONACYT por el apoyo económico durante este proceso.

Índice:

Resumen	1
Abstract	2
1. Introducción	3
a. Antecedentes	3
b. Justificación	6
c. Objetivo	6
2. Materiales y métodos antropométricos	7
a. Base de datos de Nueva Zelanda	7
b. Base de datos de México	8
c. Antropometría directa	8
d. Puntos somatométricos o landmarks	9
e. Mediciones	11
f. Índices antropométricos	13
3. Materiales y métodos de estereovisión	15
a. Equipo	15
b. Cámaras y sincronización	15
c. Montaje del sistema	17
d. Estereovisión	18
e. Calibración del sistema	27
f. Mapa de disparidad	36
g. Adquisición	40
h. Reconstrucción del rostro	40
4. Materiales y métodos de análisis	42
a. Obtención de índices y mediciones	42
b. Evaluación de error en las medidas	42
c. Análisis por Componentes Principales	42
5. Resultados y Discusión	46
a. Base de datos de Nueva Zelanda	46
b. Base de datos de México	50
6. Conclusiones	63

Referencias	65
Apéndices	69
i. Formato de datos del paciente	69
ii. Carta de consentimiento	70
iii. Algoritmo de adquisición	72
iv. Algoritmo del controlador Arduino	75
v. Elección del patrón proyectado	76
vi. Elección del algoritmo de reconstrucción	78
vii. Algoritmo del mallado	79
viii. Algoritmo de análisis antropométrico	84

Resumen

Los antropólogos han utilizado durante un largo tiempo medidas directas de rasgos faciales que necesitan la presencia del sujeto y consumen mucho tiempo. La existencia de otros métodos, invasivos y no invasivos han ampliado la posibilidad de la toma de medidas sin presencia directa del sujeto, sin embargo los costos y las dosis recibidas, en el caso de la tomografía computarizada, han provocado un lento avance hacia este tipo de medidas.

En el presente trabajo mediante un sistema de estereovisión se obtuvieron 35 modelos en tercera dimensión de sujetos mexicanos (15 mujeres y 20 hombres); la adquisición se lleva a cabo en, aproximadamente, 30 segundos por sujeto, tomando seis fotografías, lo que significa tres imágenes de estereovisión con las cuales se conformó un mallado triangular de la superficie del rostro.

Previo a las adquisiciones se realizó un análisis similar sobre rostros de una base de datos de Nueva Zelanda, pero adquiridas con un sistema muy similar; con ello se comprobó el método y la precisión del mismo.

Sobre los modelos fue posible marcar los puntos somatométricos. A partir de estos y con algoritmos computacionales se calcularon ángulos, distancias e índices de interés antropológico. Todo este análisis se lleva a cabo sobre los modelos digitales, sin la presencia del sujeto.

Mediante el uso del análisis de componentes principales se obtuvieron los rasgos de mayor y menor variación, así como la correlación entre los mismos, tanto del grupo total como las diferencias por género.

Los resultados conforman una base de datos digital con un sistema de bajo costo que puede ser utilizado por los antropólogos para futuras mediciones, no sin antes realizar algunas mejoras, tales como adquirir cámaras de mayor calidad y resolución. Los rasgos que diferencian a esta población pueden ser utilizados además por médicos y antropólogos que quieran tomar una referencia de un sujeto de características similares a las de los sujetos adquiridos en el estudio.

Abstract

Anthropologists have used for a long time direct measurements of facial features that require the presence of the subject and are time consuming. The existence of other methods, invasive and noninvasive have extended the possibility of analysis without the direct presence of the subject, however the costs and the doses in case of computer tomography received have caused a slow progress towards such measurements.

In this work, by using a stereovision system we obtained 35 models in three dimensions of Mexican subjects (15 women and 20 men); the acquisition is accomplished in approximately 30 seconds per subject, taking six photos, constituting three stereovision images with which a triangular mesh of the facial surface was created.

Prior to acquisitions a similar analysis was performed on the faces of New Zeland's database, but acquired with a very similar system; thus the method and the accuracy of it is checked.

On the models it was possible to mark landmarks. Based on these computational algorithms we performed the calculation of angles, distances and indices (rates) of anthropological interest. This analysis is carried out in the digital models, without the presence of the subject.

By using principal component analysis we obtain the features with highest and lowest variation and studied the correlation between them, both for the whole group and by gender.

The results form a digital database with a low cost system that can be used by anthropologists for future measurements, but some improvements are required, such as to use cameras with a higher quality and better resolution. The features that distinguish this population also can be used by doctors and anthropologists who want use as reference a subject of similar characteristics to those of subjects acquired in the study.

1. Introducción

El siguiente trabajo consiste en el estudio de modelos craneofaciales en tres dimensiones (en adelante 3D) que permitan marcar los puntos fiduciaros más importantes y realizar las mediciones sobre ellos a fin de obtener los índices antropométricos que definen y diferencian mejor a las caras de una población dada. Para tal fin se llevó a cabo la construcción de un sistema de adquisición mediante multi-estéreo visión que permitirá la obtención de modelos craneofaciales 3D en sujetos sanos pertenecientes a la población mexicana (y mestiza) que habita en el Valle de México.

a. Antecedentes

La antropometría facial consiste en estudiar las dimensiones de las diferentes estructuras anatómicas como la nariz, boca, orejas, labios y ojos, así como sus proporciones relativas. Dichas mediciones proveen métodos para describir objetivamente el fenotipo de un sujeto y una lista individual de anomalías, además de ser útiles para definir una métrica en la detección de nuevos síndromes de acuerdo a (Farkas et al, 1996).

La antropometría directa consiste en la medición de distancias directamente sobre la superficie del rostro con la ayuda de instrumentos especializados. Es el método preferido por los antropólogos porque permite el contacto directo con el sujeto y la posibilidad de palpar el rostro en la búsqueda de los puntos somatométricos (puntos y referencias anatómicas), que en algunos de los casos están ocultos por el tejido suave y bajo el cabello. A pesar de que requiere un largo tiempo para la examinación y personal entrenado, sigue siendo el método comúnmente usado en la clínica.

Además de este método se han utilizado fotografías y radiografías que proveen información limitada; las fotografías son métodos indirectos (que no se realizan directamente sobre la superficie del rostro), no invasivos y de bajo costo para la evaluación de tejido suave, sin embargo se utilizan más como algo ilustrativo y pocos son los antropólogos que las utilizan como técnica de medición (Sforza et al, 2006). Sin embargo es por esto que se han desarrollado métodos para crear y analizar modelos computacionales en 3D que permitan una manipulación flexible y precisa; las condiciones deseadas para estos métodos es que sean no invasivos, rápidos, lo más simples posible, con instrumentos de bajo costo y que permitan la creación de bases de datos digitales.

Entre los métodos recientes encontramos la Tomografía Computarizada (o CT, por sus siglas en inglés), sobre todo para la planeación quirúrgica (Enciso et al, 2003), sin embargo es costosa y debido a la dosis de radiación de rayos X necesaria para obtener cientos de cortes transversales, es una técnica invasiva, por lo que no es considerada como un método a elegir. Las imágenes de Resonancia Magnética no exponen al sujeto a radiación ionizante pero son todavía más costosas. El escáner láser facial que registra la textura del rostro utilizando láser y técnicas de luz visible, requiere que el sujeto permanezca inmóvil durante varios segundos o minutos mientras el escáner recorre el rostro. La estéreo fotogrametría digital es un método de visión estereoscópica, con un algoritmo de estéreo-reconstrucción en el que se pueden medir posiciones de rasgos, sus tamaños y las distancias entre ellos (Galantucci et al, 2009). Hay también sistemas de imágenes digitales de luz visible, que utilizan un sistema de mapas de profundidad creado por estéreo fotogrametría y cámaras de luz estructurada. Las anteriores son técnicas alternativas, sin embargo se siguen desarrollando técnicas que provean de un mayor costo beneficio al realizar las mediciones.

Se han realizado estudios utilizando los diferentes métodos mencionados, obteniendo resultados similares a los obtenidos por antropometría directa, ya sea realizando un marcaje previo de los puntos somatométricos o no. Wong encuentra que 17 de las 18 medidas realizadas entre puntos somatométricos (en inglés *landmarks*) son precisas comparadas con la antropometría directa, no existe una diferencia estadística en 15 de éstas, por lo que concluye que la antropometría digital es excelente y comparable a la antropometría directa (Wong et al, 2008). Utilizando imágenes digitales fotogramétricas en 3D, obtienen una precisión de 1 mm, concluyendo que la confiabilidad de las medidas en 3D es mejor o al menos comparable con la antropometría directa.

Kook compara 5 métodos de análisis: cámara estereoscópica 3D, CT 3D, escáner láser, antropometría directa y un digitalizador, localizando 15 landmarks por el mismo operador, concluyendo que todos los métodos presentan alta precisión, error menor a 0.9 mm, y reproducibilidad para el uso clínico (Kook et al, 2014).

Ozsoy compara fotografías 2D, antropometría directa y un digitalizador, concluyendo que las medidas en imágenes digitales minimizan los errores y consumen menos tiempo que los otros dos métodos (Ozsoy et al, 2009).

Metzler utiliza un equipo de fotogrametría con dos observadores y marcando los landmarks en un maniquí y medidas directas, no encontraron diferencias significativas y el error inter-observador no difiere significativamente, excluyendo los errores sistemáticos cometidos; además el error entre calibraciones no es significativo, recomendando que se tomen varias imágenes del sujeto debido al movimiento que pueda presentar (Metzler et al, 2014). Metzler concluye que los errores presentados no son clínicamente relevantes y los errores sistemáticos son insignificantes y pueden descartarse.

Bush utilizando un escáner láser concluye que las desviaciones estándar en las medidas digitales son menores a 0.5 mm, de modo que los landmarks de tejido suave pueden ser localizados de manera confiable (Bush et al, 1995).

Menezes y colaboradores marcaron los landmarks previamente y utilizando tres fotografías (una frontal y dos laterales), evaluaron el error aleatorio en las mediciones y ángulos entre landmarks, encontrando diferencias de 3 mm y 3 grados con métodos reproducibles, por lo que se considera que las coordenadas de los landmarks se obtienen con precisión y son adecuadas para obtener medidas confiables (Menezes et al, 2009). Los errores de localización de landmarks menores a 0.5 mm son despreciables (Ghoddousi et al 2007), y en mediciones menores a 1 mm son aceptables clínicamente (Mendanca et al 2013).

Finalmente, Woodward y colaboradores reportan un sistema que es el antecedente del que nosotros diseñamos y construimos (Woodward et al, 2012); su objetivo fue la reconstrucción facial y el modelado de expresiones y parte del software nos fue facilitado, realizando entre ambos grupos (en la UNAM y en la Universidad de Auckland) las mejoras necesarias para que las superficies faciales fueran adecuadas para la localización de referencias antropométricas.

b. Justificación

Aparte del interés antropológico, para conocimiento y caracterización de una población y su composición étnica, la antropometría facial se utiliza para la planeación de tratamientos de ortodoncia, cirugía ortognática, maxilofacial y plástica facial; así como el diagnóstico de malformaciones genéticas o adquiridas, síndromes, crecimiento normal o anormal e investigación morfométrica. La antropometría facial se usa en ciencias forenses, y en aplicaciones comerciales y de seguridad. Hay además aplicaciones novedosas que usan realidad virtual y aumentada, para las cuáles se generan "avatares" o modelos dinámicos de personas reales que requieren de información antropométrica precisa y representativa de una o más poblaciones (Sifakis et al, 2006).

En México no existen bases de datos en 3D, ni sistemas de adquisición 3D que se usen masivamente, sino que utilizan fotografías en 2D como método de análisis (Serrano et al, 1997), por ello se propone el uso de este sistema como herramienta de análisis que permite realizar adquisiciones simples y en diferentes regiones del país para su posterior análisis por expertos.

c. Objetivo

El objetivo general de este trabajo es la selección de puntos antropométricos en modelos 3D, adquiridos por un sistema de estereovisión, para obtener índices, distancias y ángulos de interés antropológico así como las diferencias y similitudes entre sujetos según los rasgos.

Para lograr el objetivo general se consideró en el laboratorio de Análisis de Imágenes y Visualización del CCADET-UNAM:

- Diseñar un sistema de estereovisión compuesto por 6 cámaras que permitiera la adquisición de imágenes frontal y laterales para posteriormente crear un modelo 3D del rostro.
- El sistema debe ser portable y de bajo costo.
- Aplicar en una muestra de sujetos control el sistema de adquisición elaborado, que permita la creación de una base de datos para posterior uso por médicos y antropólogos.
- Obtener valores promedios y examinar cuáles parámetros, derivados de los rasgos, son los que presentan mayor y menor variación.

2. Materiales y métodos antropométricos

a. Base de datos de Nueva Zelanda

Inicialmente se utilizó una base de datos de Nueva Zelanda, la cual se obtuvo en el Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de Auckland. El estudio consistió en la adquisición de 16 sujetos con un escáner de luz estructurada que permitió la reconstrucción de los rostros en 3D con una malla triangular (Woodward, 2007). Estos rostros se obtuvieron en formato “.wrl” (VRML – Virtual Reality Modeling Language) se recortó la superficie facial con el software *MeshLab*¹, así mismo se contaba con más sujetos que fueron descartados debido a que presentaban vello facial abundante que no permitió la reconstrucción adecuada y por lo mismo no permitía la localización de landmarks situados en los labios y mentón.

La desventaja de este sistema es que la adquisición no se puede efectuar en una toma única, es decir, se requieren tres tomas para cubrir la superficie total del rostro (Figura 2.1).



Figura 2.1. Resultado del escáner de luz estructurada, requiere de tres cuadros para representar totalmente la superficie facial. El color amarillo se debe a la iluminación utilizada para la adquisición.

Debido a que se requieren de tres cuadros que no son adquiridos simultáneamente el sujeto podría moverse y requerir un post proceso de alineación de los cuadros.

¹ MeshLab <http://meshlab.sourceforge.net/>

b. Base de datos de México

Los sujetos a participar en el estudio deben cumplir las siguientes características:

- Ser mexicano o mestizo, es decir, que al menos haya un mexicano en sus tres generaciones anteriores.
- Ser adulto joven (20 a 40 años).
- No tener *piercings*, maquillaje o vello facial prominente al momento de la adquisición.
- No haber sufrido cirugías o fracturas en el rostro.

El sujeto debe llenar el formato de datos (Apéndice i), además del consentimiento informado por escrito (Apéndice ii).

Estos sujetos serán adquiridos por el sistema descrito en la sección 3.b, en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET).

c. Antropometría directa

Consiste en medir de manera individual distancias lineales y ángulos que representan los rasgos, en este caso, del rostro, utilizando diferentes instrumentos tales como calipers de desplazamiento, de extensión, cinta métrica, compás, entre otros (Swennen et al, 2006). Además requiere de experiencia del investigador, aunque consume tiempo tanto para el sujeto como para el médico o antropólogo, pero al no contar posteriormente con el sujeto, no es posible corregir errores de mediciones ni la extracción de nuevos rasgos.

Es el primer método para la evaluación 3D del rostro, es *in vivo* y cualitativo, sigue siendo utilizado en varios campos que cubren un amplio espectro en medicina. Entre los antropólogos es considerada el estándar de oro para las valoraciones *in vivo* por su simplicidad y bajo costo (Preedy, 2012).

d. Puntos somatométricos o landmarks

Visto como un paisaje en relieve, la superficie facial del rostro humano es una composición de valles y colinas, pendientes, crestas, aristas y hendiduras alrededor de una superficie relativamente esférica; a través del relieve facial se definen puntos somatométricos o *landmarks* (George, 2007). Estos puntos sirven como mapa en el rostro que permite definir las diferentes áreas que corresponden a puntos sobre el esqueleto, se definen en líneas de sutura, orificios y protuberancias; la mejor identificación de estos depende de la experiencia del observador.

Los landmarks elegidos en este estudio se muestran en la Tabla 2.1, con su correspondiente nomenclatura y localización (Kolar et al, 1997).

	Landmark	Nom.	Localización
1	Nasion	n	El punto medio más profundo en la nasiente de la nariz.
2	Endocatio*	en	Comisura interna de la hendidura de los ojos donde cierran los párpados.
3	Exocatio*	ex	Comisura externa de la hendidura de los ojos donde cierran los párpados.
4	Alar*	al	El punto más lateral del ala nasal.
5	Subnasal	sn	Punto de intersección del plano medio sagital con la línea que une los bordes inferiores de la nariz.
6	Labial superior	ls	Punto de la línea media sobre el borde del labio superior.
7	Stomion	sto	Punto de la línea media, entre ambos labios cuando están cerrados de forma natural.
8	Labial inferior	li	Punto de la línea media, sobre borde del labio inferior.
9	Gnation	gn	El punto más bajo en la línea media en el borde inferior del mentón.
10	Chelion*	ch	Comisura externa de la boca, donde los bordes exteriores de los labios superior e inferior se encuentran.
11	Sublabial	sl	El punto medio del surco mentolabial.
12	Pogonio	pog	El punto más sobresaliente en la mitad del mentón.
13	Pronasal	prn	El punto más sobresaliente en la punta nasal.
14	Zygion*	zy	El punto más lateral en el arco cigomático.

Tabla 2.1. Landmarks utilizados en este estudio.

(*) Puntos marcados a izquierda y derecha del rostro.

Los landmarks son seleccionados en el software *Amira*², utilizando la opción “Create → Data → Landmarks”; se siguió el mismo orden para marcar todos los puntos en los sujetos y cada punto seleccionado aparece como una esfera con un diámetro de 0.3 mm sobre el mallado. Se observa cómo se lleva a cabo la selección de en la Figura 2.2, todos estos puntos generan un archivo de texto, tipo “.ascii” (ASCII - American Standard Code for Information Interchange) con las coordenadas de cada uno de los landmarks.

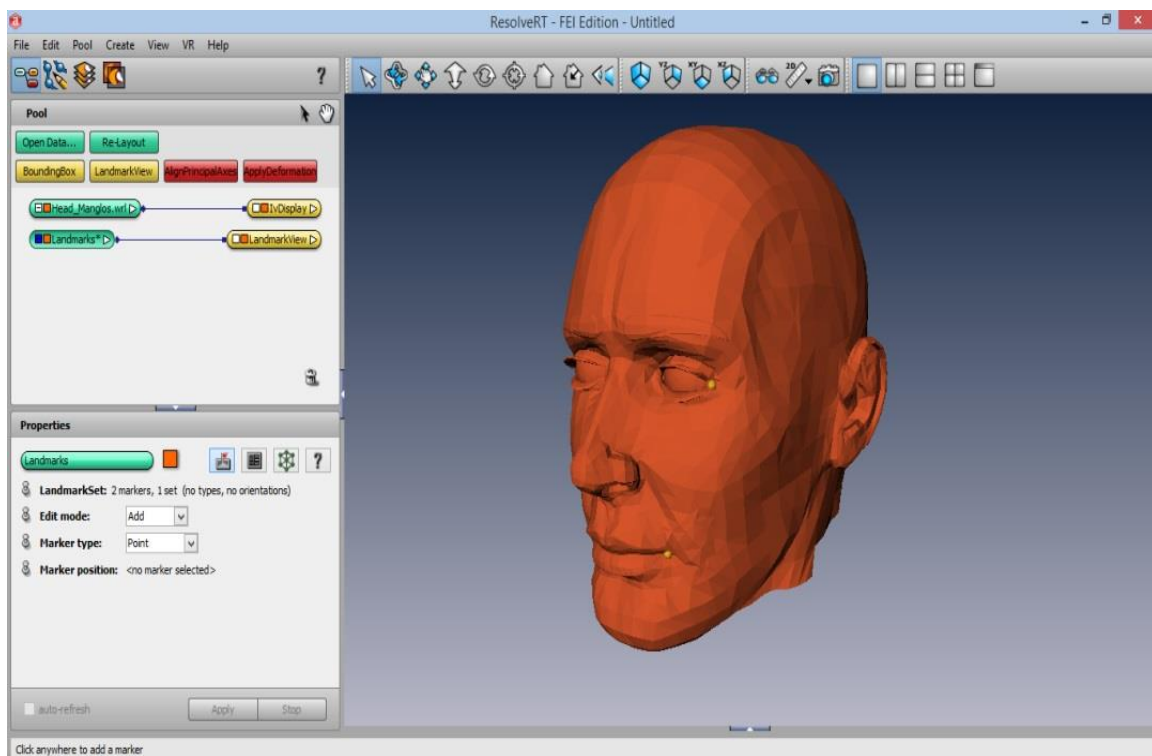


Figura 2.2. Marcaje de dos puntos somatométricos (landmarks) en el software Amira; estos aparecen a la derecha como esferas amarillas en el ojo y comisura izquierdos.

La Figura 2.3 muestra los landmarks a estudiar localizados en el modelo un rostro que forma parte de un glosario antropométrico virtual (AnthroGloss), realizado por el proyecto CAESAR® (Civilian American and European Surface Anthropometry Resource Project) y el H-ANIM (Humanoid Animation Working Group).

² Amira, Visage Imaging, Inc. <http://www.visageimaging.com>

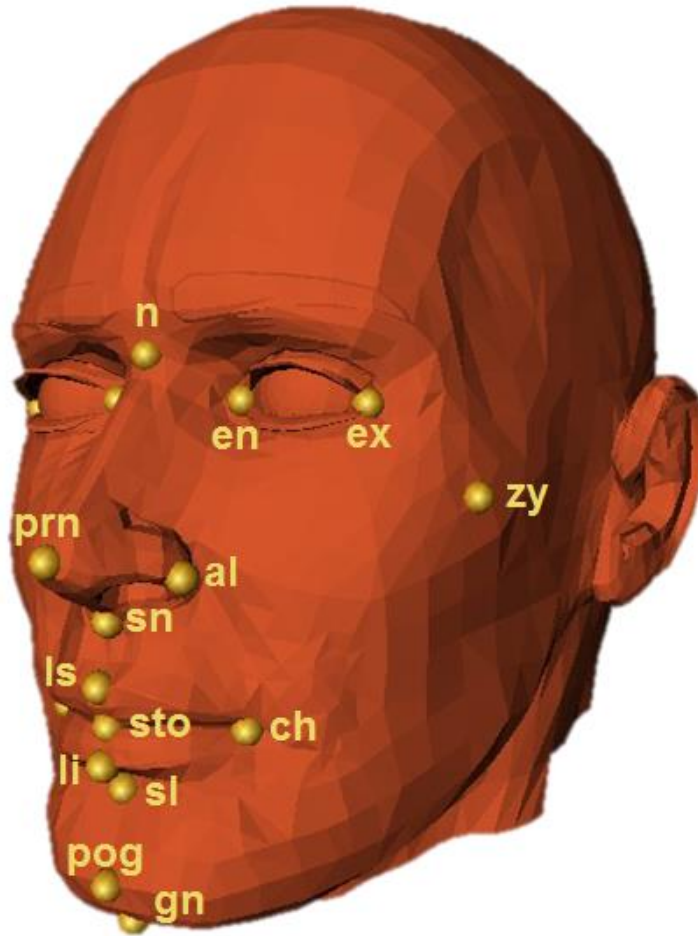


Figura 2.3. Todos los landmarks localizados en el modelo virtual de un rostro.

e. Mediciones

El número de mediciones que se pueden realizar son casi ilimitadas, sin embargo no todas ellas son igual de exactas, anatómicamente significativas o relevantes. Por ello es necesario seleccionar ciertas mediciones que describan mejor la morfología cráneo-facial que se desea estudiar. Las medidas de las distancias tomadas en este estudio se muestran en la Tabla 2.2.

Se debe tomar en cuenta que hay dos reglas en la antropometría: las mediciones deben ser precisas, es decir, de errores menores a 1 mm (Kook et al, 2014) y simples, lo que influye en la decisión de qué mediciones tomar, sin embargo deben ser suficientes para describir el rostro y permitan comparaciones.

	Nombre	Distancia
1	Altura facial superior	n-sto
2	Altura facial total	n-gn
3	Altura facial inferior	sn-gn
4	Altura mandibular	sto-gn
5	Anchura nasal	al ⁱ -al ^d
6	Altura nasal	n-sn
7	Altura labial superior	sn-sto
8	Anchura bucal	ch ⁱ -ch ^d
9	Altura cutánea labial superior	sn-ls
10	Altura del labio superior	ls-sto
11	Altura del labio inferior	sto-li
12	Anchura binocular	ex ⁱ -ex ^d
13	Anchura intercantal	en ⁱ -en ^d
14	Altura de la boca	ls-li
15	Distancia <i>stomion</i> a sublabial	sto-sl
16	Altura del mentón	sl-gn
17	Distancia <i>exocation</i> izquierdo a labial inferior	ex ⁱ -li
18	Distancia <i>alar</i> izquierdo a <i>pronasal</i>	al ⁱ -prn
19	Anchura facial	zy ⁱ -zy ^d
20	Distancia de <i>exocation</i> derecho a <i>subnasal</i>	ex ^d -sn
21	Distancia de <i>exocation</i> izquierdo a <i>subnasal</i>	ex ⁱ -sn
22	Distancia de <i>chelion</i> derecho a <i>subnasal</i>	ch ^d -sn
23	Distancia de <i>chelion</i> izquierdo a <i>subnasal</i>	ch ⁱ -sn
24	Distancia de <i>exocation</i> derecho a labial inferior	ex ^d -li
25	Distancia de <i>pogonio</i> a <i>nasion</i>	pog-n
26	Distancia de <i>nasion</i> a <i>pronasal</i>	prn-n
27	Distancia de <i>pogonio</i> a <i>pronasal</i>	pog-prn

Tabla 2.2. Mediciones de distancias entre los landmarks.

(i) izquierda, (d) derecha del sujeto.

f. Índices antropométricos

Matemáticamente los índices antropométricos (en adelante, simplemente "índices") están definidos como un cociente entre dos distancias, que indican la proporcionalidad de una región del rostro que permite una evaluación objetiva y cuantitativa de la morfología facial y su proporción. Además, como se consideran distancias entre puntos coordinados, los índices no dependen de la orientación o posición de cada rostro en la base de rostros; al ser también proporciones, dependen poco del tamaño absoluto de cada individuo.

Se dividen en dos categorías: regionales, de una sola área o interregionales que son medidas de áreas distintas, por ejemplo, de la nariz y el rostro. Cada índice cuenta con un valor promedio y un intervalo de variación según el grupo, basado en edad, sexo y etnicidad. Dada la desviación estándar (*SD*) aquellos valores que se encuentran entre $\pm 2 SD$ son valores normales y entre $\pm 1 SD$ son valores óptimos, los que se encuentran fuera se puede considerar desproporcionados, o hasta *outliers* (valores atípicos). Sin embargo dos medidas desproporcionadas pueden compensarse y dar un índice balanceado, por lo tanto para determinar una desproporción es necesario analizar qué medidas la están causando (Naini, 2011).

Los ángulos medidos, propuestos por George, se muestran en la Tabla 2.3 y los índices utilizados en este estudio son algunos de los propuestos por Edler y George, se muestran en la Tabla 2.4 (George, 2007), (Edler et al, 2006).

	Ángulo	Descripción
1	Labial-orbital	ex ⁱ -li-ex ^d
2	Nasal-orbital	ex ⁱ -sn-ex ^d
3	Nasal-chelial	ch ⁱ -sn-ch ^d
4	Nasal-facial	pog-n-prn
5	Nasal-mentón	n-prn-pog
6	Mentón-facial	n-pog-prn

Tabla 2.3. Ángulos calculados en el estudio.

	Índice	Descripción
1	Altura facial-facial superior	(n-sto)/(n-gn)
2	Altura facial-facial inferior	(sn-gn)/(n-gn)
3	Altura mandibular-facial	(sto-gn)/(n-gn)
4	Altura mandibular-facial superior	(sto-gn)/(n-sto)
5	Altura mandibular-facial inferior	(sto-gn)/(sn-gn)
6	Altura labial superior-ancho bucal	(sn-sto)/(ch ⁱ -ch ^d)
7	Altura cutánea-total labial superior	(sn-ls)/(sn-sto)
8	Altura bermellón-total labial superior	(ls-sto)/(sn-sto)
9	Altura bermellón-cutánea labial superior	(ls-sto)/(sn-ls)
10	Contorno vertical del labial superior	(sn-sto)/((sn-ls)+(ls-sto))
11	Bermellón	(ls-sto)/(sto-li)
12	Altura facial superior-ancho binocular	(n-sto)/(ex ⁱ -ex ^d)
13	Ancho intercantal-nasal	(en ⁱ -en ^d)/(al ⁱ -al ^d)
14	Altura nasal-facial	(n-sn)/(n-gn)
15	Ancho nasal-bucal	(al ⁱ -al ^d)/(ch ⁱ -ch ^d)
16	Altura labial superior-facial superior	(sn-sto)/(n-sto)
17	Altura labial superior-mandibular	(sn-sto)/(sto-gn)
18	Altura labial superior-nasal	(sn-sto)/(n-sn)
19	Nasal	(al ⁱ -al ^d)/(n-sn)
20	Bucal	(ls-li)/(ch ⁱ -ch ^d)
21	Intercantal	(en ⁱ -en ^d)/(ex ⁱ -ex ^d)
22	Altura mandibular-mentón	(sl-gn)/(sto-gn)
23	Longitud labial superior	(sn-sto)/(sn-gn)
24	Longitud labial inferior	(sto-sl)/(sn-gn)
25	Longitud mentón	(sl-gn)/(sn-gn)
26	Altura labial inferior-mandibular	(sto-sl)/(sto-gn)
27	Altura labial inferior-mentón	(sto-sl)/(sl-gn)
28	Triángulo labial orbital	(ex ⁱ -li)/(ex ⁱ -ex ^d)

Tabla 2.4. Índices calculados en el estudio.

3. Materiales y métodos de estereovisión

a. Equipo

Consiste en:

- 6 cámaras PS3-EYE, marca Sony.
- Un marco rígido de aluminio que soporta las cámaras y permite que mantengan su posición de calibración. Un tripié con contrapesos soporta al sistema sin que oscile.
- Microcontrolador Arduino³ para sincronizar las cámaras por hardware (Apéndice iv).
- Sistema de iluminación difusa que evita las sombras sobre el rostro (tres difusores).
- La proyección de un patrón de líneas sobre el rostro (Apéndice v).
- Un script en lenguaje C++ implementando una estructura de “ring buffer” y “multi-hilos” (Apéndice iii).

b. Cámaras y sincronización

Las cámaras utilizadas son del modelo PS3-EYE con sensores CMOS (Omnivision OV7720/OV7721), se desmontaron de su caja original (Figura 3.1), cuidando no dañar ninguno de los componentes de la tarjeta de la cámara y preservando los micrófonos (Figura 3.2).



Figura 3.1. Desmontaje de la cámara.

³ Arduino SA <http://www.arduino.cc/>



Figura 3.2. Cámara desmontada, vista anterior y posterior.

Con el software *OpenSCAD* se diseñó la nueva caja que contiene a las cámaras, para ello se midieron sus partes sobresalientes y orificios para que fuera atornillada, lo que permite tener acceso a la parte posterior de la cámara para sincronizarlas al pin FSIN (Frame Synchronize Input) que es la entrada de sincronización de cuadros del sensor (Figura 3.3).

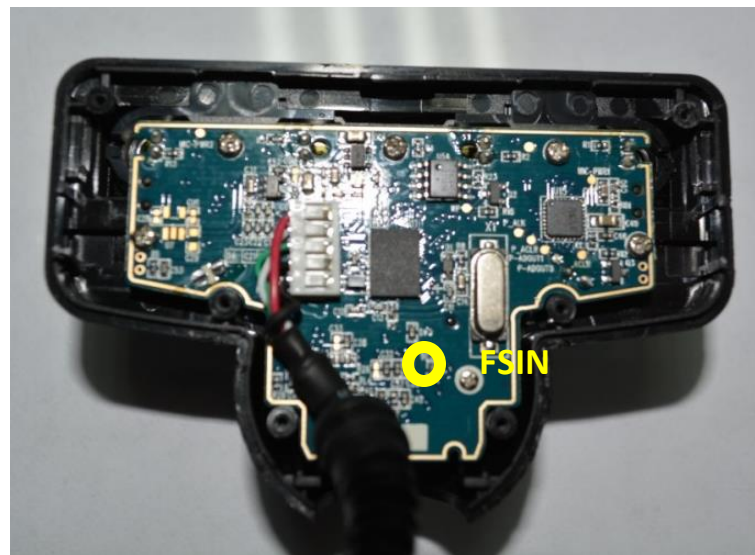


Figura 3.3. Localización del pin FSIN en la tarjeta de la cámara.

Al conectar las cámaras al FSIN se permite tener un punto de control para modificar los sensores de las cámaras, permitiendo ser controladas por una señal externa que adquirirá un cuadro, dado por el tiempo de integración y tiempo de inicio de cada cuadro adquirido. La señal de modulación por ancho de pulsos (PWM) se realiza con la salida pin 9 de un microcontrolador Arduino One, que provee una PWM de 8-bit. Con esta señal se sincronizan las seis cámaras para que tomen cuadros de imágenes de manera simultánea, con una velocidad de 60 cuadros por segundo.

Para el arreglo de cada par de cámaras, estas se colocaron de tal manera que las lentes estén lo más próximas posibles, ya que los detalles del rostro que queremos obtener estarán muy cerca de las cámaras. Además, en lugar de colocar la cámara en posición izquierda/derecha como en la configuración usual en estéreo visión, se colocaron en posición arriba/abajo (Figura 3.4) debido a que la simetría izquierda/derecha del rostro, la configuración arriba/abajo facilita la reconstrucción.



Figura 3.4. Arreglo de cada par de cámaras.

c. Montaje del sistema

El marco de aluminio consiste en una “H” de aluminio, de tal manera que mantenga a las cámaras en la misma posición entre sí, es decir, la posición en la que serán calibradas.

Las cámaras se colocan en el arreglo ya mostrado de tal manera que un par esté al frente del sujeto y los otros dos pares al extremo lateral, uno frente al otro. Del lado contrario a las cámaras dos hilos tensos, amarrados a la mesa en la que se coloca la laptop utilizada para la adquisición, sirven como contrapeso para mantener nivelado el marco y absorben rápidamente cualquier oscilación. Un contrapeso de cuatro kilogramos, colgando del tripié, baja el centro de gravedad, absorbiendo vibraciones y perturbaciones.

El montaje del sistema se muestra en la Figura 3.5.



Figura 3.5. Sistema de adquisición con tres pares de cámaras.

d. Estereovisión

La estereovisión se basa en la correspondencia de puntos en dos o más imágenes que permitan estimar un modelo 3D mediante la búsqueda de píxeles correspondientes y convertir la posición 2D en profundidad 3D; la profundidad se encuentra dadas las diferencias que se obtienen al observar entre una cámara y otra. Es uno de los temas más estudiados en visión por computadora y se encuentra activo en las áreas de investigación, entre sus aplicaciones podemos encontrar la creación de modelos del sistema visual humano, navegación robótica, manipulación, interpolación de imágenes, creación de modelos 3D y la combinación de imágenes reales y generadas por computadora.

Supone que las cámaras son del tipo *estenopeicas* o “pinhole” el modelo de esta cámara se muestra en la Figura 3.6 (Xu et al, 1996), donde \mathcal{F} es el plano focal y se encuentra a una distancia fija f del plano imagen \mathcal{I} , conocida como distancia focal; en una situación ideal C , foco o centro óptico, se encuentra en el plano \mathcal{F} .

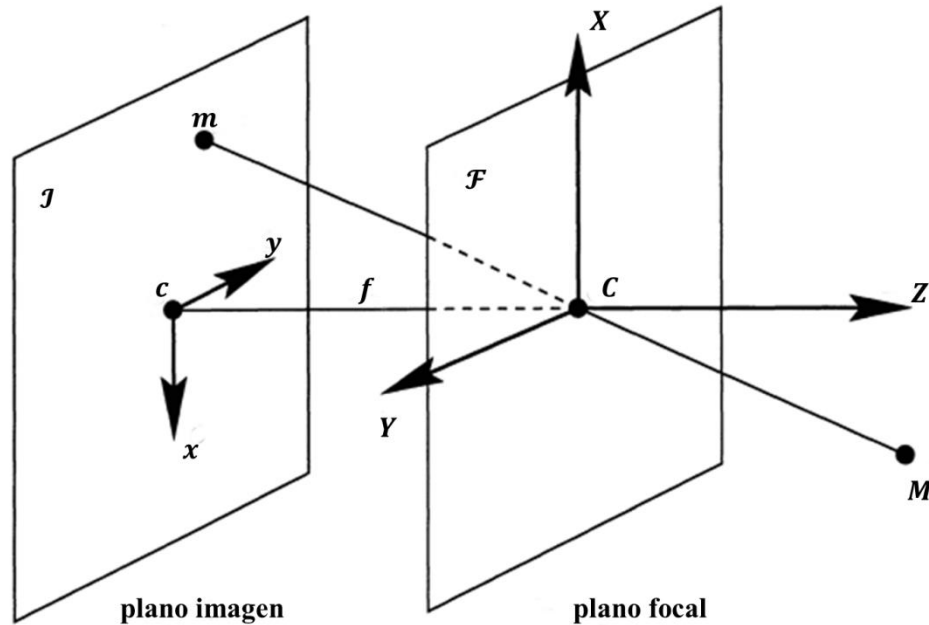


Figura 3.6. Modelo de cámara “pinhole”.

Se asume que la luz que entra a la cámara únicamente lo hace a través del “pinhole” y llega directamente al plano imagen. Los haces de luz emitidos o reflejados por un objeto pasan a través del “pinhole” y forman una imagen invertida del objeto sobre el plano imagen. Cada punto del objeto sobre cada punto de la imagen y el “pinhole” forman una línea recta. A la línea que pasa por C , que es perpendicular al plano imagen y que lo intersecta en c , el punto principal, se le conoce como eje óptico. Así mismo el plano focal también es perpendicular a este eje.

El plano imagen tiene un sistema de coordenadas (c, x, y) , donde c es el origen. Para un sistema tridimensional se elige un sistema de coordenadas de la cámara (C, X, Y, Z) , donde C es el origen y Z coincide con el eje óptico; los ejes X y Y son paralelos a x y y pero con dirección opuesta. La relación entre las coordenadas de la imagen en 2D y las del espacio en 3D se muestra a continuación (3.1).

$$\frac{x}{X} = \frac{y}{Y} = \frac{f}{Z} \quad (3.1)$$

Usualmente se reemplaza el plano imagen con uno virtual del lado opuesto al plano focal.

La relación entre las coordenadas 3D y las de la imagen pueden ser reescritas linealmente como (3.2).

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Sea \mathbf{P} (3.3), una matriz de 3×4 , llamada matriz de proyección en perspectiva.

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Dado un punto en 3D $\mathbf{M} = [X, Y, Z]^T$ y su punto en la imagen $\mathbf{m} = [x, y]^T$, los vectores aumentados se denotan como $\tilde{\mathbf{m}} = [x, y, 1]^T$ y $\tilde{\mathbf{M}} = [X, Y, Z, 1]^T$, reescribiendo la ecuación (3.2) se obtiene (3.4).

$$s\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{P}\tilde{\mathbf{M}} \quad (3.4)$$

Siendo $s = S$, un escalar arbitrario distinto de cero. Únicamente puede tomar un valor igual a cero en el centro óptico, ya que sólo en este caso $U = V = S = 0$ y $X = Y = Z = 0$.

Se asume que los puntos 3D están expresados en el sistema coordenado de la cámara, pero pueden expresarse en cualquier sistema coordenado, llamado sistema coordenado del mundo real.

Para pasar del sistema coordenado centrado en C , al nuevo sistema coordenado centrado en O , se efectúa una rotación \mathbf{R} , seguida de una traslación $\mathbf{t} = CO$. Así para un punto \mathbf{M}_c , expresado en las coordenadas de la cámara, y un punto \mathbf{M}_w expresado en las coordenadas del mundo real se obtiene la siguiente relación (3.5).

$$\mathbf{M}_c = \mathbf{R}\mathbf{M}_w + \mathbf{t} \quad (3.5)$$

Donde la matriz \mathbf{R} y el vector \mathbf{t} describen la orientación y posición de la cámara respecto al nuevo sistema coordenado, y se les conoce como parámetros extrínsecos. Son seis los parámetros extrínsecos, tres para la matriz \mathbf{R} (3.6), que aunque consta de 9 elementos debe satisfacer las restricciones (3.7) y tres para el vector \mathbf{t} (3.8).

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{R}\mathbf{R}^T = \mathbf{I}, \quad \det(\mathbf{R}) = 1 \quad (3.7)$$

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Se tiene el sistema de coordenadas de la imagen (c, x, y) , centrado en el punto principal c , y el sistema coordenado (o, u, v) , en el que se ocupan los píxeles en la imagen y usualmente está centrado en la esquina superior izquierda de la imagen.

Los parámetros intrínsecos son:

- k_u y k_v , las unidades a lo largo de los ejes u y v , respecto a las unidades utilizadas por (c, x, y) . Asumiendo que los ejes u y x son paralelos.
- Un ángulo θ , entre los ejes u y v .
- $[u_o, v_o]^T$, coordenadas del punto principal c en el sistema (o, u, v) .

Dado un punto $\tilde{\mathbf{m}}_o = [x, y]^T$, en el sistema de coordenadas original y $\tilde{\mathbf{m}}_n = [u, v]^T$, las coordenadas del píxel en el nuevo sistema coordenado se tiene la relación (3.9).

$$\tilde{\mathbf{m}}_o = \mathbf{H}\tilde{\mathbf{m}}_n = \begin{bmatrix} k_u & k_u \cot \theta & u_o \\ 0 & k_v / \sin \theta & v_o \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Se obtiene una nueva matriz \mathbf{A} (3.10), que es el resultado de la matriz $\mathbf{P}_n = \mathbf{H}\mathbf{P}$, normalizada por \mathbf{P}_N .

$$\mathbf{A} = \mathbf{P}_n \mathbf{P}_N = \mathbf{H}\mathbf{P} \mathbf{P}_N = \begin{bmatrix} f k_u & f k_u \cot \theta & u_o & 0 \\ 0 & f k_v / \sin \theta & v_o & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Sea $\alpha_u = fk_u$ y $\alpha_v = fk_v$, los factores de escala, así la matriz A llamada matriz de parámetros intrínsecos de la cámara y se define como (3.11).

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_u & \alpha_u \cot \theta & u_o \\ 0 & \alpha_v / \sin \theta & v_o \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Se requiere de la llamada *geometría epipolar* para explicar la correspondencia estéreo, así como información adicional de posición y calibración en el caso de escenas estáticas (Szeliski, 2011).

Utilizando la ecuación de una línea (3.12), se considera un vector $\mathbf{l} = [a, b, c]^T$ para un punto $\mathbf{x} = [x, y, z]^T$, satisface (3.13).

$$ax + by + c = 0 \quad (3.12)$$

$$\tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{l} = 0 \quad (3.13)$$

Si dicha línea pasa por dos puntos dados $\tilde{\mathbf{x}}_1^T \mathbf{l} = 0$ y $\tilde{\mathbf{x}}_2^T \mathbf{l} = 0$, entonces $\mathbf{l} = \tilde{\mathbf{x}}_1 \times \tilde{\mathbf{x}}_2$, además $\lambda \mathbf{l}$ es la misma línea con λ un factor de escala distinto de cero.

Para $\tilde{\mathbf{x}}'$ en la segunda imagen existe un punto de correspondencia \mathbf{x}' (3.14) en el espacio definido por el segmento de línea $c' \mathbf{m}'_\infty$ que pasa por los puntos $\tilde{\mathbf{x}}'$ y \mathbf{m}'_∞ que es un punto al infinito.

$$\mathbf{x}' = \lambda \tilde{\mathbf{x}}', \quad \lambda \in (0, \infty) \quad (3.14)$$

Si se escribe en coordenadas de la cámara uno (3.15).

$$\mathbf{x} = \mathbf{R} \mathbf{x}' + \mathbf{t} = \lambda \mathbf{R} \tilde{\mathbf{x}}' + \mathbf{t} \quad (3.15)$$

La proyección del segmento de línea $c' \mathbf{m}'_\infty$ en la cámara uno es una línea $\mathbf{l}_{x'}$, es la línea epipolar de \mathbf{x}' . Las líneas epipolares están definidas por dos puntos, el primero se obtiene de la proyección de \mathbf{x} con $\lambda = 0$, (3.16).

$$\tilde{\mathbf{e}} = \frac{1}{t_z} \mathbf{t} \quad (3.16)$$

A la proyección del centro óptico c' de la segunda cámara sobre la primera cámara se le conoce como epipolo de la primera imagen e (Figura 3.7).

El segundo punto (3.17) se obtiene con $\lambda = \infty$, siendo r_3 la tercera fila de R .

$$\tilde{x}_\infty = \frac{1}{r_3^T \tilde{x}'} R \tilde{x}' \quad (3.17)$$

Por lo tanto, se define a $l_{x'}$ (3.18).

$$l_{x'} = \tilde{e} \times \tilde{x}_\infty = t \times R \tilde{x}' \quad (3.18)$$

Dado que la geometría epipolar es simétrica a dos cámaras se obtiene análogamente \tilde{e}' , el epipolo de la segunda imagen y l'_x , la línea epipolar de x .

En los epipolos son intersecciones de todas las líneas epipolares y satisfacen las ecuaciones de la línea epipolar.

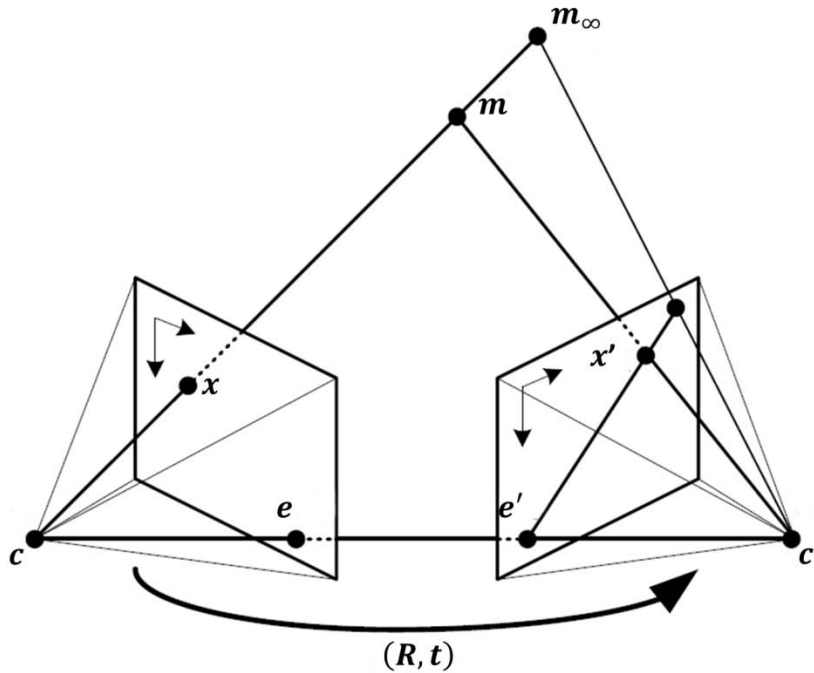


Figura 3.7. Segmento correspondiente a un haz.

Al proyectar la segunda imagen hacia la primera se obtiene otro segmento de línea, delimitado por el correspondiente epipolo e . Si se extienden ambos segmentos hacia el infinito se obtienen un par de líneas epipolares correspondientes, que son la intersección de dos planos imagen con el plano epipolar y pasa por el centro de las cámaras c , c' y el punto de interés m (Figura 3.8). La línea que une los centros de las cámaras c , c' y los epipolos e , e' es conocida como línea base.

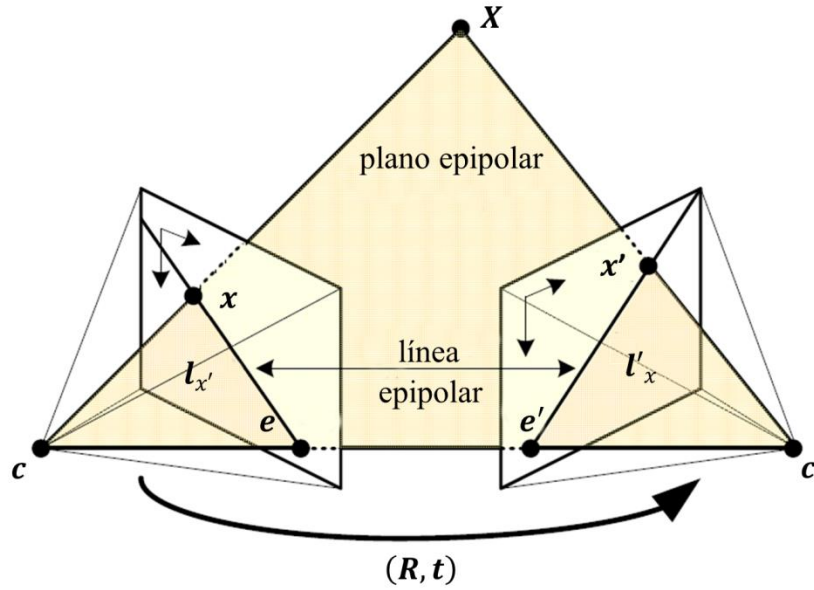


Figura 3.8. Conjunto de líneas epipolares en el plano epipolar.

Se utilizan las llamadas coordenadas normalizadas, sea $X = [X, Y, Z]^T$ un punto en ambas imágenes bajo el sistema coordenado de la cámara uno, se tienen las coordenadas en la imagen uno $x = [x, y, 1]^T$ y en la imagen dos $x' = [x', y', 1]^T$. Sea $X' = [X', Y', Z']^T$ el mismo punto pero en el sistema coordenado de la cámara dos.

Del modelo “pinhole” se obtiene (3.19) y por lo tanto (3.20).

$$\tilde{x} = X/Z, \quad \tilde{x}' = X'/Z' \quad (3.19)$$

$$\tilde{x} = (Z'/Z)R\tilde{x}' + t/Z \quad (3.20)$$

Si se efectúa el producto cruz con t a ambos lados, se tiene (3.21).

$$t \times \tilde{x} = (Z/Z')t \times R\tilde{x}' \quad (3.21)$$

Y al efectuar el producto punto con \tilde{x} , se tiene (3.22).

$$\tilde{x}^T t \times (R\tilde{x}') = 0 \quad (3.22)$$

Se define el mapeo $[\cdot]_{\times}$ de un vector 3D a una matriz de 3×3 asimétrica o simétrica de sesgo. Que tiene la propiedad $[t]_{\times} = -[t]_{\times}^T$, y usando este mapeo $t \times \tilde{x} = [t]_{\times}\tilde{x}$, por lo tanto (3.22) se reescribe como (3.23), llamada ecuación

epipolar y E se conoce como matriz esencial y está definida por la rotación y traslación entre dos cámaras.

$$\tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{E} \tilde{\mathbf{x}}' = 0, \mathbf{E} = [\mathbf{t}]_{\times} \mathbf{R} \quad (3.23)$$

$[\mathbf{t}]_{\times}$ es asimétrica, por lo tanto $\det([\mathbf{t}]_{\times}) = 0$, así se tiene (3.24).

$$\det(\mathbf{E}) = \det([\mathbf{t}]_{\times}) \det(\mathbf{R}) = 0 \quad (3.24)$$

Con esta matriz se pueden reescribir las ecuaciones de la línea epipolar como (3.25).

$$\mathbf{l}_{x'} = \mathbf{E} \tilde{\mathbf{x}}', \quad \mathbf{l}'_x = \mathbf{E}^T \tilde{\mathbf{x}} \quad (3.25)$$

Que por lo tanto las líneas epipolares deben satisfacer (3.26):

$$\tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{l}_{x'} = 0, \quad \mathbf{l}'_x \tilde{\mathbf{x}}' = 0 \quad (3.26)$$

Y con ello los epipolos satisfacen (3.27):

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{e}}^T \mathbf{E} \tilde{\mathbf{x}}' = 0, \quad \tilde{\mathbf{e}}^T \mathbf{E} = \tilde{\mathbf{e}}^T [\mathbf{t}]_{\times} \mathbf{R} = \mathbf{0}^T \\ \mathbf{E} \tilde{\mathbf{e}}' = [\mathbf{t}]_{\times} \mathbf{R} \tilde{\mathbf{e}}' = 0, \quad \mathbf{R} \tilde{\mathbf{e}}' = \mathbf{t} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Del epipolo de la primera imagen para tender a infinito $t_z = 0$, así la traslación de la primera cámara debe ser dentro del plano focal de la primera cámara, y para que ambos epipolos en las dos imágenes tiendan al infinito $\mathbf{r}'_3 \mathbf{t} = 0$. Así el centro óptico de la primera cámara se encuentra en el plano focal de la segunda, si ambos planos focales son el mismo, se tiene que $t_z = 0$, r_{13} y r_{23} son iguales a cero, y dado que $\|\mathbf{r}'_i\| = 1$, entonces $r_{33} = 1$, por lo tanto \mathbf{R} (3.28).

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

De lo anterior se observa que la rotación solo puede efectuarse alrededor del eje óptico de las cámaras, sólo hay términos lineales en las coordenadas imagen, por lo tanto las líneas epipolares son paralelas en ambas imágenes y la orientación es independiente de los puntos imagen.

Sean \mathbf{m} y \mathbf{m}' puntos en coordenadas de su imagen uno y dos respectivamente, que satisfacen (3.29):

$$\tilde{\mathbf{m}}^T \mathbf{F} \tilde{\mathbf{m}}' = 0, \quad \mathbf{F} = \mathbf{A}^{-T} \mathbf{E} \mathbf{A}'^{-1} \quad (3.29)$$

\mathbf{A} y \mathbf{A}' son las matrices intrínsecas de cada cámara, tal que $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^{-1} \tilde{\mathbf{m}}$.

De acuerdo a (Hartley et al, 2003) la reconstrucción 3D asume que la posición del punto y la posición de las cámaras es conocida, sin embargo para poder dar una solución se considera \mathbf{m} un punto en 3D que ven ambas cámaras con una posición relativa que puede ser modificada por rotación \mathbf{R} y traslación $\mathbf{t} = \mathbf{c} - \mathbf{c}'$. Se asume entonces que las coordenadas del mundo real coinciden con las coordenadas de la segunda cámara, por lo tanto se cumplen (3.30) y (3.31).

$$s \tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{A} [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} \mathbf{M}' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$s' \tilde{\mathbf{m}}' = \mathbf{A}' [\mathbf{I} \quad \mathbf{0}] \begin{bmatrix} \mathbf{M}' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Es de lo anterior que se deriva la definición de \mathbf{F} que se trata de una matriz 3×3, llamada matriz fundamental, que permite expresar la ecuación epipolar de dos imágenes sin normalizar de la misma manera que se haría con dos imágenes normalizadas. Dada la restricción (3.32), \mathbf{F} sólo cuenta con siete parámetros independientes.

$$\det(\mathbf{E}) = 0 \Rightarrow \det(\mathbf{F}) = 0 \quad (3.32)$$

La matriz \mathbf{F} describe las líneas epipolares en la primera imagen por puntos en la segunda imagen y \mathbf{F}^T describe las líneas epipolares en la segunda imagen por puntos en la primera imagen, cumpliendo las propiedades que cumple \mathbf{E} . Esto se obtuvo de las propiedades de la matriz \mathbf{E} y de que \mathbf{A} es invertible.

e. Calibración del sistema

La calibración de las cámaras es necesaria en visión por computadora 3D para extraer información métrica a partir de imágenes en 2D (Zhang, 1999). La técnica utilizada únicamente requiere de un patrón de tablero de ajedrez mostrado en diferentes orientaciones moviendo el patrón o la cámara.

El patrón fue impreso en papel con una impresora láser y adherido a una superficie plana.

Dados un punto en el espacio 3D, $\mathbf{M} = [X, Y, Z]^T$ y la proyección de la imagen $\mathbf{m} = [u, v]^T$ está dada por (3.33)

$$s\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{A}[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]\tilde{\mathbf{M}} \quad (3.33)$$

Sin pérdida de generalidad se asume que $Z = 0$ en el sistema de coordenadas del mundo real, así (3.34)

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}[\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{r}_3 \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}[\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

El punto $\tilde{\mathbf{M}}$ y su imagen $\tilde{\mathbf{m}}$ están relacionados por una homografía $\mathbf{H} = \mathbf{A}[\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{t}]$, que es una matriz 3x3 que se define como un factor de escala.

Se considera $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \quad \mathbf{h}_2 \quad \mathbf{h}_3] = \lambda \mathbf{A}[\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{t}]$, con λ un factor de escala. Dado que \mathbf{r}_1 y \mathbf{r}_2 son orto normales se tienen las restricciones (3.35) y (3.36) a los parámetros intrínsecos para cada homografía (transformación de coordenadas).

$$\mathbf{h}_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 = 0 \quad (3.35)$$

$$\mathbf{h}_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 \quad (3.36)$$

Una homografía es una transformación con 8 grados de libertad que consisten en 6 parámetros extrínsecos (3 de rotación y 3 de traslación) y 2 restricciones en los parámetros intrínsecos.

Para resolver la calibración se obtiene mediante una solución analítica y una solución no lineal basada en el criterio de máxima similitud o probabilidad.

Se define $\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1}$, donde \mathbf{B} es simétrico definido por un vector 6D (3.37).

$$\mathbf{b} = [B_{11} \quad B_{12} \quad B_{22} \quad B_{13} \quad B_{23} \quad B_{33}]^T \quad (3.37)$$

Sea para la i -ésima columna $\mathbf{h}_i^T \mathbf{B} \mathbf{h}_j = v_{ij}^T \mathbf{b}$, pero dadas las restricciones se tiene (3.38)

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{22})^T \end{bmatrix} \mathbf{b} = 0 \quad (3.38)$$

Si se toman n imágenes se tiene una relación $\mathbf{V} \mathbf{b} = 0$, \mathbf{V} una matriz $2n \times 6$. Si $n \geq 3$ existe una solución única para \mathbf{b} definida como un factor de escala, la solución a la relación está dada por el eigenvector de $\mathbf{V}^T \mathbf{V}$ asociado al menor eigenvalor.

Una vez que es estimado \mathbf{b} se obtiene la matriz \mathbf{A} , teniendo así las relaciones (3.39):

$$\mathbf{r}_1 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1, \mathbf{r}_2 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2, \mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2 \text{ y } \mathbf{t} = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_3 \quad (3.39)$$

$$\text{Con } \lambda = \frac{1}{\|\mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1\|} = \frac{1}{\|\mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2\|}.$$

Debido al ruido, la rotación \mathbf{R} no satisface dichas condiciones, por eso se estima. Dadas n imágenes y m puntos en el plano modelo se minimiza la expresión (3.40):

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|m_{ij} - \hat{\mathbf{m}}(\mathbf{A}, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, M_{ij})\|^2 \quad (3.40)$$

Donde $\hat{\mathbf{m}}(\mathbf{A}, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, M_{ij})$ es la proyección de M_j .

La matriz \mathbf{R} está denotada por un vector \mathbf{r} de 3 parámetros paralelo al vector unitario (\mathbf{v}) que describe al eje de rotación y con magnitud igual a al ángulo de rotación φ . \mathbf{R} y \mathbf{r} están relacionados por la fórmula de rotación de Rodrigues (3.41), descrita en (Rapp, 2012).

$$\mathbf{R} = \cos \varphi \mathbf{I}_3 + (1 - \cos \varphi) \mathbf{r} \mathbf{r}^T + \sin \varphi (\mathbf{r} \times \mathbf{v}) \quad (3.41)$$

Adicionalmente existe una distorsión de la lente, por ello dadas (u, v) coordenadas reales del pixel y (\tilde{u}, \tilde{v}) las coordenadas reales; (x, y) son las coordenadas libres de distorsión y (\tilde{x}, \tilde{y}) las coordenadas con distorsión, obteniendo las relaciones (3.42) y (3.43):

$$\tilde{x} = x + x[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \quad (3.42)$$

$$\tilde{y} = y + y[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \quad (3.43)$$

Con k_1 y k_2 son los coeficientes de distorsión radial, considerando (3.44), (3.45) y que el centro de la distorsión radial es el mismo que el punto principal se tiene (3.46).

$$\tilde{u} = u_0 + \alpha\tilde{x} + c\tilde{y} \quad (3.44)$$

$$\tilde{v} = v_0 + \beta\tilde{y} \quad (3.45)$$

$$\begin{bmatrix} (u - u_0)(x^2 + y^2) & (u - u_0)(x^2 + y^2)^2 \\ (v - v_0)(x^2 + y^2) & (v - v_0)(x^2 + y^2)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u} - u \\ \tilde{v} - v \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Dados m puntos y n imágenes se expresa $\mathbf{D}\mathbf{k} = \mathbf{d}$, con $\mathbf{k} = [k_1 \ k_2]^T$ resolviendo (3.47)

$$\mathbf{k} = (\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T \mathbf{d} \quad (3.47)$$

Se estiman k_1 y k_2 , se refinan todos los parámetros ya obtenidos y se vuelve a resolver con $\tilde{\mathbf{m}}$ hasta que converja.

Para llevar a cabo la calibración se debe seguir el siguiente procedimiento:

- Imprimir un patrón en una superficie plana. Se imprimió un patrón de tablero de ajedrez con cuadros de 3 cm x 3 cm, que se pegó en una superficie de acrílico.
- Tomar imágenes en diferentes orientaciones.
- Detectar los puntos de las imágenes, se le indica al programa las orillas del patrón y el tamaño de los cuadros, marcando los puntos de cada cuadro.
- Estimar los cinco parámetros extrínsecos e intrínsecos.
- Estimar los coeficientes de distorsión radial.
- Refinar todos los parámetros.

Esto permitirá que las coordenadas y por tanto las medidas realizadas sean medidas reales, es decir, en cm; además permitirá que todas las imágenes estén en el mismo sistema coordenado.

Para cada cámara se tomaron 14 fotografías del patrón en diferentes posiciones como se muestra el ejemplo en la Figura 3.9.

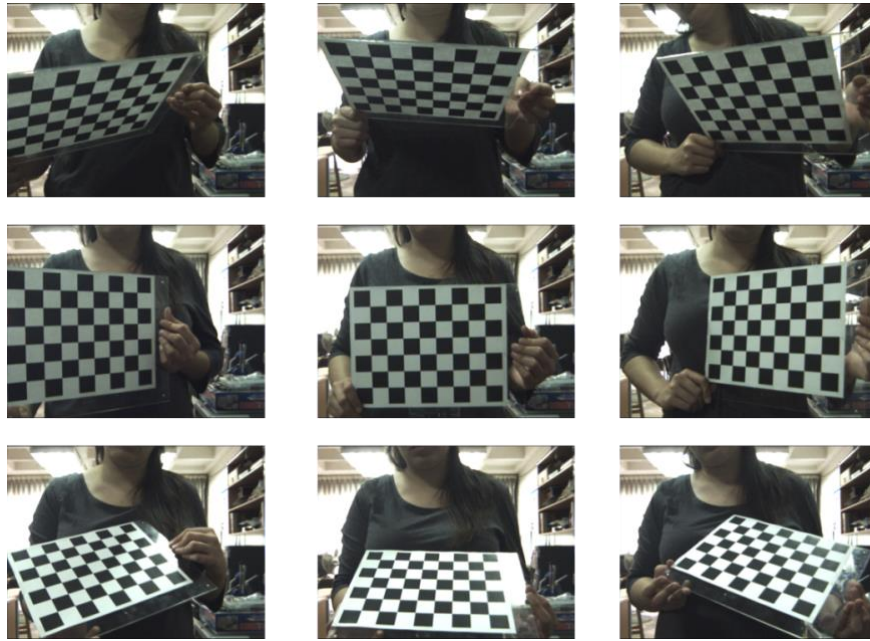


Figura 3.9. Imágenes del patrón.

Posteriormente se cargan las imágenes utilizando el *Camera Calibration Toolbox for Matlab®* y se seleccionan las esquinas que delimitan el patrón en cada imagen, siempre en el mismo orden (Figura 3.10).

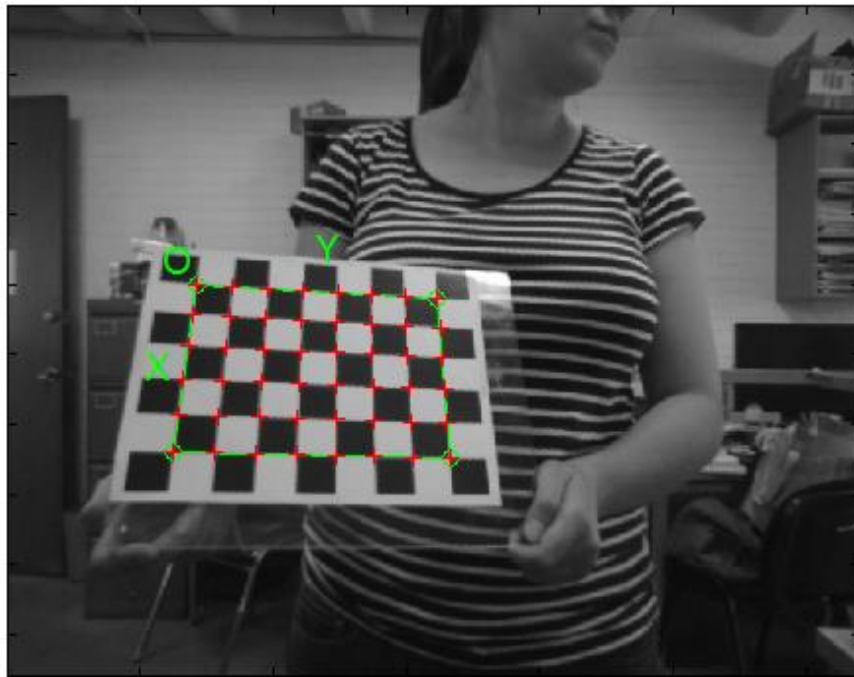


Figura 3.10. Detección de las esquinas de los cuadrados del patrón.

Utilizando restricciones para los parámetros intrínsecos dada una homografía se debe resolver un problema con 8 grados de libertad de homografía, 6 parámetros extrínsecos (3 de rotación y 3 de traslación) y 2 restricciones de parámetros intrínsecos.

El número de imágenes es igual al número de ecuaciones a resolver, y para más de 3 imágenes esa solución es única y está definida por un factor de escala. Al resolver estas ecuaciones se obtiene una matriz que contiene los parámetros intrínsecos de la cámara y con estos, los parámetros extrínsecos.

Debido al ruido en los datos, no se satisface en general las propiedades de la matriz de rotación y se da una estimación y se minimiza la ecuación de proyección. Para la distorsión se obtiene que es principalmente dominada por las componentes radiales.

Para la calibración del sistema fue necesario rotar las imágenes para que se mantengan en un esquema izquierda/derecha, es decir, la configuración en la que fueron desarrollados los algoritmos de rectificación utilizados, por ello a partir de ahora la imagen superior será la imagen izquierda y la inferior será la imagen derecha.

Inicialmente se obtienen los parámetros intrínsecos ignorando la distorsión y se obtienen los coeficientes de distorsión radial para refinar los parámetros resolviendo la proyección hasta que converja o se minimice. Los parámetros intrínsecos (Tabla 3.1) y los parámetros extrínsecos (Figura 3.11) para una de las cámaras, el proceso se realizó para las seis cámaras.

Distancia focal	$fc = [53.256132 \quad 53.187342] \pm [0.201987 \quad 0.216526]$
Punto principal	$cc = [33.090400 \quad 24.366590] \pm [0.327252 \quad 0.307594]$
Sesgo	$\alpha_c = [0.00000] \pm [0.00000]$ => angle of pixel axes = 90.00000 ± 0.00000 degrees
Distorsión	$kc = [-0.01141 \quad 0.02279 \quad -0.00032 \quad 0.00004 \quad 0.00000]$ $\pm [0.00082 \quad 0.00231 \quad 0.00015 \quad 0.00016 \quad 0.00000]$
Error de píxel	$err = [0.01204 \quad 0.01339]$

Tabla 3.1. Parámetros intrínsecos.

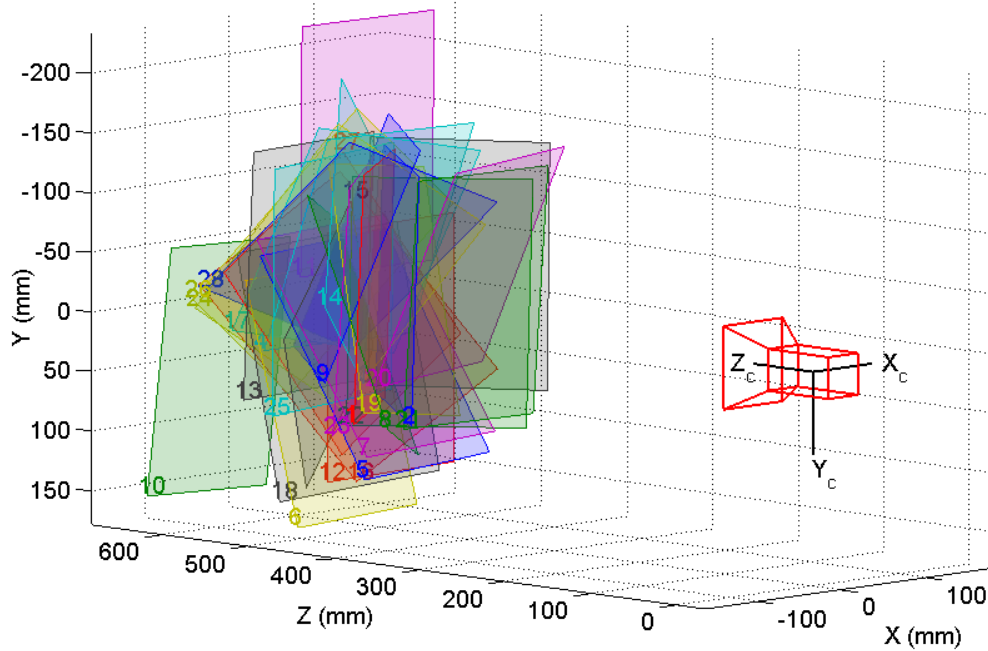


Figura 3.11. Estimación de los parámetros extrínsecos. A la derecha se encuentra la cámara (en rojo) y su sistema de coordenadas.

Posteriormente se introducen los datos obtenidos para la cámara izquierda y derecha, obteniendo así los parámetros extrínsecos del par de cámaras (Figura 3.12).

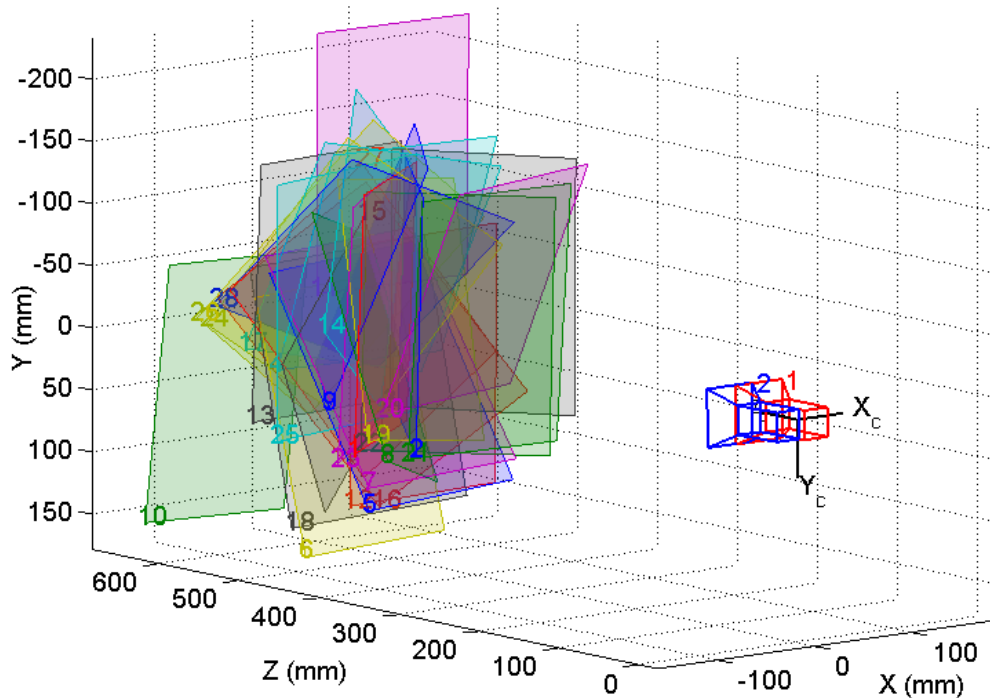


Figura 3.12. Parámetros extrínsecos de un par de cámaras (a la derecha, una en rojo y otra en azul)

Utilizando los parámetros obtenidos se genera una matriz que permite rectificar las imágenes de cada cámara, logrando que ambas imágenes estén en el mismo sistema coordenado y corregidas por distorsión, de lo contrario no es posible encontrar el pixel correspondiente de una imagen en su par sobre la llamada línea epipolar (Figura 3.13).



Figura 3.13. Par de imágenes sin rectificar.

Sin embargo las imágenes rectificadas con esta calibración de 28 imágenes no permiten encontrar los mismos puntos sobre líneas paralelas en la imagen (Figura 3.12), por lo que fue necesario llevar a cabo una segunda calibración, utilizando 35 imágenes.

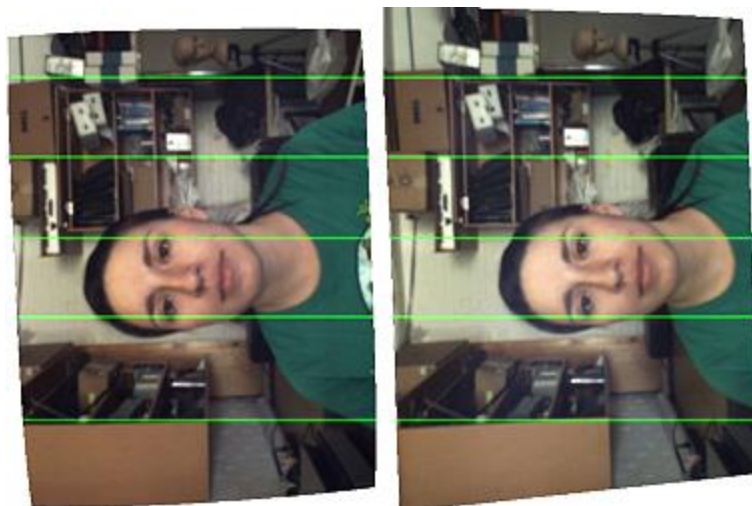


Figura 3.12. Rectificación utilizando calibración de 28 imágenes.

Tras la recalibración, las imágenes rectificadas obtenidas se muestran en la Figura 3.13, observando que el mismo pixel de una imagen y su par se encuentran sobre la misma línea epipolar.



Figura 3.13. Rectificación utilizando la calibración de 35 imágenes.

La rectificación permite asegurarse que las líneas epipolares son horizontales y que la disparidad de los puntos al infinito es 0, además se re-escalan las imágenes tomando en cuenta las diferentes distancias focales. El resultado de una geometría rectificada se utiliza en el algoritmo de estereovisión para describir la relación inversa (3.48) entre los mapas de profundidad 3D (Z) y las disparidades (d), y con ello se describe la relación (3.49) de las coordenadas de los pixeles correspondientes en las imágenes izquierda y derecha.

$$d = f^B / Z \quad (3.48)$$

Donde f es la distancia focal y B la línea base, que une los centros ópticos de las cámaras.

$$x' = x + d(x, y), \quad y' = y \quad (3.49)$$

Tras la rectificación los pixeles correspondientes (x, y) y $(x', y') = (x + d, y)$ se guardan en espacio imagen de disparidad que será utilizado posteriormente.

Adicionalmente se realizaron dos calibraciones “cruzadas” con el fin de conocer la traslación y rotación de la cámara frontal respecto a las cámaras laterales; dicha calibración consistió en tomar la cámara frontal y lateral superior (derecha en un caso e izquierda en el otro), de manera tal que ambas cámaras vean el patrón de calibración, lo que limitó el número de ángulos posibles. La localización de las cámaras entre sí se presenta en la Figura 3.14, donde la cámara superior frontal se muestra en rojo y las cámaras superiores laterales en azul.

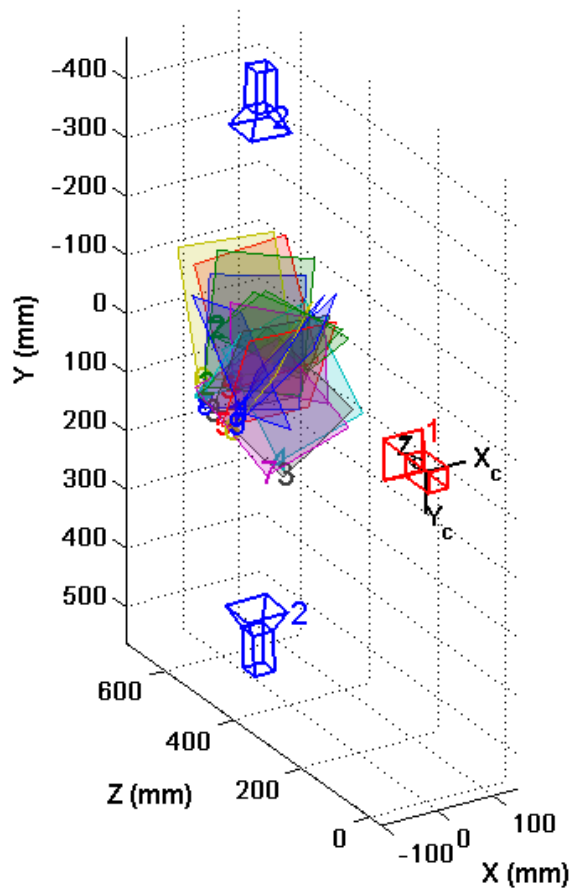


Figura 3.14. Posición de las cámaras superiores laterales respecto la cámara superior frontal.

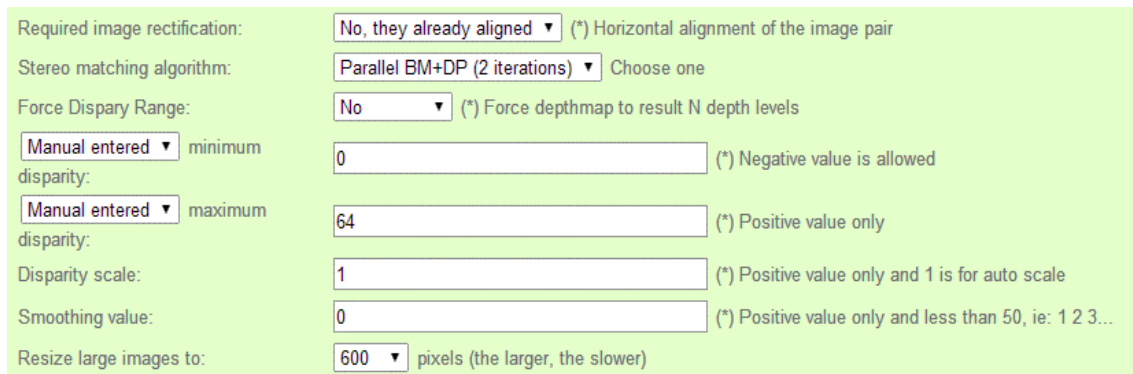
Debido al ángulo de 90° entre la cámara superior frontal y los pares superiores laterales no es posible cubrir todos los ángulos posibles para la calibración, por ello se tiene un error reproducible en cada calibración cruzada que fue corregido manualmente, es decir, añadiendo el valor del error al algoritmo de reconstrucción.

f. Mapa de disparidad

Dadas las imágenes de cada par de cámaras se obtiene un mapa de disparidad que contiene la información de profundidad de la imagen obtenida por los píxeles de correspondencia entre las dos imágenes.

Este mapa se refiere a la distancia entre dos puntos de correspondencia en el par de imágenes izquierda y derecha, cada pixel contiene la información de disparidad respecto a una de las imágenes, en este caso la izquierda.

Utilizando el programa “Online Computational Stereo Vision⁴”, seleccionando las opciones de la Figura 3.15, el algoritmo de estéreo se eligió tras analizar todos los disponibles (Apéndice vi).



The screenshot shows a web interface for stereo vision processing with the following settings:

- Required image rectification: No, they already aligned (Horizontal alignment of the image pair)
- Stereo matching algorithm: Parallel BM+DP (2 iterations) (Choose one)
- Force Disparity Range: No (Force depthmap to result N depth levels)
- Manual entered minimum disparity: 0 (Negative value is allowed)
- Manual entered maximum disparity: 64 (Positive value only)
- Disparity scale: 1 (Positive value only and 1 is for auto scale)
- Smoothing value: 0 (Positive value only and less than 50, ie: 1 2 3...)
- Resize large images to: 600 pixels (the larger, the slower)

Figura 3.15. Opciones seleccionadas para obtener el mapa de disparidad.

Se obtiene el mapa de disparidad para cada par de imágenes (Figura 3.16). Este programa es una página web de dominio público desarrollada en la Universidad de Auckland, los autores de la misma nos permitieron el uso para la reconstrucción de los mapas de disparidad adquiridos con nuestro sistema que es parte de una colaboración entre ambos laboratorios.

⁴ Online Computational Stereo Vision
https://www.ivs.auckland.ac.nz/quick_stereo/index.php



Figura 3.16. Mapa de disparidad frontal.

Sin embargo dado que el mapa no es lo suficientemente detallado para nuestros objetivos, fue necesario la implementación de un patrón de líneas proyectado sobre el rostro (Figura 3.17), que permite obtener más detalles (Figura 3.18); esto se debe a que la homogeneidad del color del rostro confunde al sistema, con este patrón el sistema es capaz de reconocer mejor las profundidades del rostro (Apéndice v).



Figura 3.17. Patrón de líneas proyectado sobre el rostro.

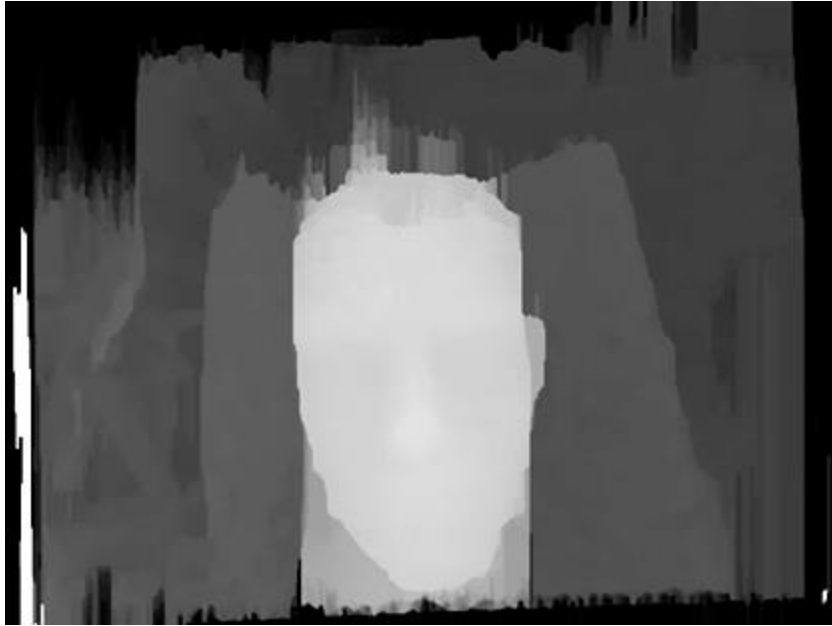


Figura 3.18. Mapa de disparidad con patrón de líneas proyectado sobre el rostro.

Para dicho patrón se utilizaron dos proyectores LCD (despliegue de cristal líquido), (ambos marca BenQ, modelo MP515ST de tiro corto y modelo MP670XGA de tiro largo) con una configuración user2, sRGB, brillo con valor 20 para el modelo MP670XGA y con valor de 40 para el modelo MP515ST, ambos con valor de contraste igual a cero. Se colocan lateralmente logrando cubrir toda la superficie del rostro.

A pesar de conseguir esta mejora, las imágenes laterales se encontraban poco iluminadas por lo cual fue necesario incluir iluminación que permita una mejor reconstrucción del rostro. Adicionalmente la distancia de las orejas a las cámaras no debe ser desigual, de lo contrario la lejanía de las cámaras al objeto a reconstruir se vuelve errónea, por lo tanto en un aproximado la nariz del sujeto debe encontrarse a 48 cm de cada cámara. La Figura 3.19, muestra al sujeto alejado del lado izquierdo y derecho.

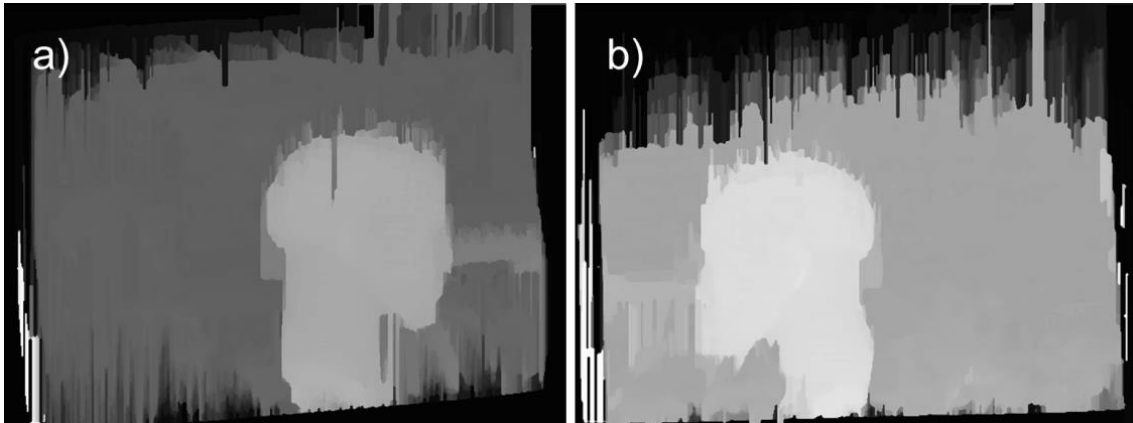


Figura 3.19. Maniquí alejado del a) lado izquierdo y b) lado derecho.

En ambas figuras se aprecian los errores de reconstrucción debido a la lejanía, sin embargo si se centra el sujeto (Figura 3.20) se observa una mejora en ambos lados.

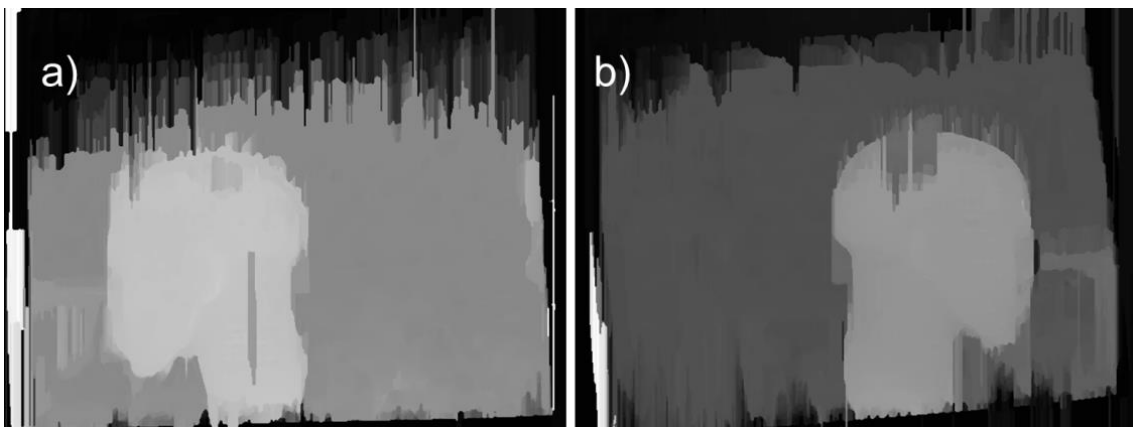


Figura 3.20. Lateral a) derecho, b) izquierdo con el rostro centrado.

Dado que aún existe un problema de iluminación es necesario que la luz sea difusa, es decir, que no produzca puntos calientes ni sombras sobre el rostro.

Hay que considerar que la superficie y forma del rostro del maniquí refleja la luz y tiene formas marcadas que no se encuentran en el rostro humano, además las zonas en las que aún se tiene problema en la reconstrucción no son del interés del estudio y en general estarán cubiertas por el cabello de los sujetos.

g. Adquisición

Para llevar a cabo las adquisiciones, a los sujetos se les pide que retiren el cabello de su frente y orejas, así como lentes u otros objetos como joyas; que se sienten con la espalda recta y mirando al par de cámaras frontales, con sus orejas a la altura de los pares laterales y con su rostro en posición neutral (no sonreír o realizar otro gesto).

Con el script del Apéndice iii, se toman 14 imágenes por minuto, por cámara para cada sujeto, para así evitar seleccionar una en la que el sujeto parpadee o esté en movimiento; una de estas imágenes se seleccionará para la reconstrucción del rostro. Un ejemplo de las seis imágenes elegidas para cada sujeto se muestra en la Figura 3.21.



Figura 3.21. Seis imágenes adquiridas utilizadas para la reconstrucción del rostro.

h. Reconstrucción del rostro

El mapa de disparidad de cada par de cámaras permite la obtención de la nube de puntos 3D, que contienen ruido y pueden presentar huecos o picos, (Liu, 2011). Este proceso se repite para los otros dos pares de cámaras, cada mapa de disparidad tiene su centro coincidente con el centro en la cámara superior (o izquierda tras la rotación). Para llevar los tres sistemas de cámaras a un mismo sistema en el mundo real, las imágenes laterales se trasladan hacia la cámara frontal superior, utilizando la ecuación (3.5), la traslación y rotación obtenida en la calibración cruzada.

Con los tres mapas de puntos obtenidos se construye el mapa de puntos desde las tres vistas, con este se realiza el mallado sobre el que se localizarán los landmarks (Apéndice vii). El mallado triangular es la representación más común para las formas del rostro, consiste en una serie de vértices y triángulos, dichos triángulos definen cómo se conectan los vértices en la superficie. Un ejemplo del mallado obtenido se muestra en la Figura 3.22.

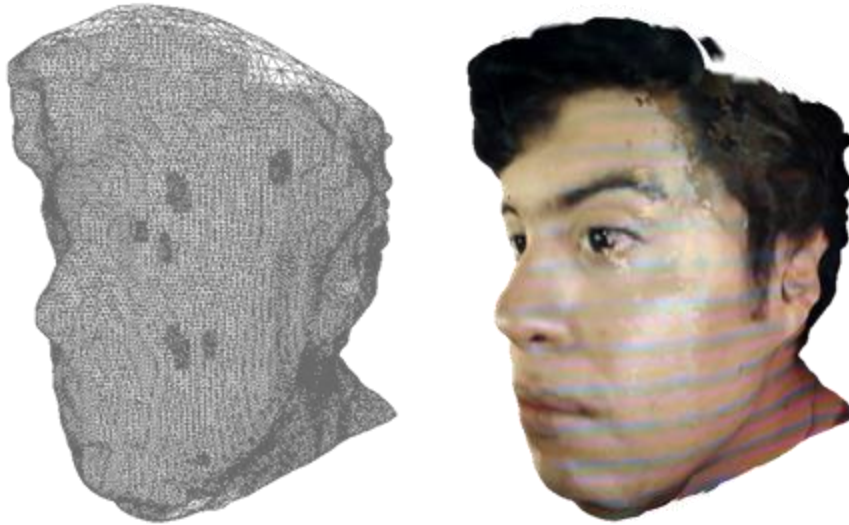


Figura 3.22. Mallado obtenido de la reconstrucción del rostro.

4. Materiales y métodos de análisis

a. Obtención de índices y mediciones

Dadas las coordenadas 3D obtenidas para cada landmark en *Amira*, se obtienen las mediciones entre landmarks con el algoritmo de análisis antropométrico que desarrollamos (Apéndice viii). Este algoritmo lee las coordenadas (x, y, z) de cada landmark y con la relación de geometría analítica para calcular la distancia entre dos puntos (4.1) se obtiene d_{ij} correspondiente a cada una de las mediciones de la Tabla 2.

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (4.1)$$

Los índices son una división entre estas mediciones (4.2).

$$\text{índice}_{ij} = \frac{d_i}{d_j} \quad (4.2)$$

b. Evaluación de error en las medidas

Para evaluar el error en las medidas antropométricas se utiliza el error técnico de medición (TEM, por sus siglas en inglés), que se define por la ecuación (4.3), en la que d_k es la diferencia entre la misma medición realizada por el mismo observador, y n es el número de sujetos evaluados (Frisancho, 1990).

$$TEM = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n d_k^2}{2n}} \quad (4.3)$$

c. Análisis de Componentes Principales

El Análisis de Componentes Principales (PCA, del inglés) es un método que permite identificar patrones en una serie de datos y expresarla de acuerdo a sus similitudes y diferencias, al encontrar los patrones se reduce el número de dimensiones sin una gran pérdida de información.

Lo descrito a continuación se basa en (Jolliffe, 2002), (Shlens, 2005) y (Dunteman, 1989).

La idea central del PCA es reducir la dimensionalidad de una serie de datos en los que hay un gran número de variables interrelacionadas, conservando lo más posible la variación presente en los datos. La reducción se logra transformando a una nueva serie de datos, llamados componentes principales, que no tienen correlación entre sí, o es mínima, y están ordenados de tal forma que los primeros contengan la mayor variación presente en todas las variables originales. En otras palabras, PCA permite extraer todos los modos de variación y ordenarlos según su importancia, de allí el nombre de "componentes principales" (en orden de relevancia). Esto permite descartar los menos significativos, reduciendo la dimensionalidad de la información.

El cálculo de las componentes principales reduce la solución de un problema de eigenvector-eigenvalor a una matriz simétrica semidefinida positiva y se concentra en las varianzas.

Se supone x un vector con p variables aleatorias, las varianzas de las p variables y su correlación son de interés.

Se busca una función lineal $\alpha_1^T x$ de elementos de x que tengan la máxima varianza, siendo α_1 un vector de p constantes que satisfaga (4.4).

$$\alpha_1^T x = \alpha_{11}x_1 + \alpha_{12}x_2 + \dots + \alpha_{1p}x_p = \sum_{j=1}^p \alpha_{1j}x_j \quad (4.4)$$

La función lineal $\alpha_2^T x$ no debe estar correlacionada con $\alpha_1^T x$, además de tener una máxima varianza, se continúa hasta encontrar $\alpha_k^T x$ que es la k -ésima componente principal. Es posible encontrar p componentes principales pero se espera que sean m , con $m \ll p$.

Para encontrar las componentes principales se considera un vector x de p variables aleatorias con una matriz de covarianza conocida Σ . El (i, j) -ésimo elemento es la covarianza entre el i -ésimo y el j -ésimo elemento de x con $i \neq j$ y la varianza del j -ésimo cuando $i = j$; si no se conoce Σ , se reemplaza por una matriz muestra de covarianza S .

Dado $k = 1, 2, \dots, p$ la k -ésima componente principal está dada por $z_k = \alpha_k^T x$, con α_k un eigenvector de Σ correspondiente al k -ésimo mayor eigenvalor λ_k . Si α_k es unitario ($\alpha_k^T \alpha_k = 1$) la $var(z_k) = \lambda_k$.

Al obtener la forma de los componentes principales se considera $\alpha_1^T x$ con α_1 el vector que maximiza $var[\alpha_1^T x] = \alpha_1^T \Sigma \alpha_1$, utilizando la restricción $\alpha_1^T \alpha_1 = 1$, es decir, la suma del cuadrado de sus elementos es igual a uno. Otra restricción puede ser que $Máx[\alpha_{1j}] = 1$.

Para maximizar $\alpha_1^T \Sigma \alpha_1$ sujeto a $\alpha_1^T \alpha_1 = 1$ se aproxima utilizando los *multiplicadores de Lagrange*, maximizando (4.5).

$$\alpha_1^T \Sigma \alpha_1 - \lambda(\alpha_1^T \alpha_1 - 1) = 0 \quad (4.5)$$

Siendo λ el multiplicador de Lagrange, y si se diferencia por α_1^T se obtiene (4.6).

$$(\Sigma - \lambda I_p) \alpha_1 = 0 \quad (4.6)$$

Con I_p la matriz identidad $p \times p$, λ el eigenvalor de Σ y α_1 el eigenvector correspondiente. Para decidir qué p -eigenvector satisface $\alpha_1^T x$ con mayor varianza, se maximiza (4.7), obteniendo la mayor λ posible.

$$\alpha_1^T \Sigma \alpha_1 = \alpha_1^T \lambda \alpha_1 = \lambda \alpha_1^T \alpha_1 = \lambda \quad (4.7)$$

Dado que α_1 es el mayor eigenvector correspondiente al mayor eigenvalor de Σ , entonces λ_1 es el mayor eigenvalor.

Para obtener $\alpha_2^T x$ se maximiza $\alpha_2^T \Sigma \alpha_2$ con la condición de no estar relacionado con $\alpha_1^T x$, es decir, la $cov[\alpha_1^T x, \alpha_2^T x] = 0$, por lo tanto cumple (4.8)

$$cov[\alpha_1^T x, \alpha_2^T x] = \alpha_1^T \Sigma \alpha_2 = \lambda \alpha_1^T \alpha_2 \quad (4.8)$$

Y con ello las relaciones (4.9) que se utilizan para especificar la correlación cero.

$$\alpha_1^T \Sigma \alpha_2 = 0, \alpha_2^T \Sigma \alpha_1 = 0, \alpha_1^T \alpha_2 = 0 \text{ y } \alpha_2^T \alpha_1 = 0 \quad (4.9)$$

Se requiere de una restricción de normalización y se maximiza (4.10) con λ y ϕ dos multiplicadores de Lagrange.

$$\alpha_2^T \Sigma \alpha_2 - \lambda(\alpha_2^T \alpha_2 - 1) - \phi \alpha_2^T \alpha_1 = 0 \quad (4.10)$$

Si se deriva respecto a α_2^T se obtiene (4.11).

$$\Sigma \alpha_2 - \lambda \alpha_2 - \phi \alpha_1 = 0 \quad (4.11)$$

Y multiplicando por α_1^T (4.12).

$$\alpha_1^T \Sigma \alpha_2 - \lambda \alpha_1^T \alpha_2 - \phi \alpha_1^T \alpha_1 = 0 \quad (4.12)$$

Dada la restricción $\alpha_1^T \alpha_1 = 1$ y las relaciones de la covarianza se concluye que $\phi = 0$, por lo tanto $(\Sigma - \lambda I_p) \alpha_2 = 0$, siendo así λ un eigenvalor de Σ y α_2 el eigenvector correspondiente.

Se asume que Σ no tiene eigenvalores repetidos, pues no se cumpliría la restricción $\alpha_1^T \alpha_2 = 0$, por lo tanto los demás eigenvalores λ_k se obtienen de acuerdo a (4.13).

$$\text{var}[\alpha_k^T \mathbf{x}] = \lambda_k, \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (4.13)$$

Si se desea utilizar la matriz de correlación, las componentes principales se definen de acuerdo a (4.14), donde A contiene los eigenvectores de la matriz de correlación y \mathbf{x}^* los valores estandarizados. El j -ésimo elemento de \mathbf{x}^* es $x_j / \sigma_{jj}^{1/2}$, $j = 1, 2, \dots, p$; σ_{jj} es la varianza de x_j . Así la matriz de covarianza de \mathbf{x}^* es la matriz de correlación de \mathbf{x} .

$$\mathbf{z} = \mathbf{A}^T \mathbf{x}^* \quad (4.14)$$

Las componentes principales obtenidas con la matriz de correlación no son las mismas que los obtenidos con Σ excepto en circunstancias especiales, porque las componentes principales sólo son invariantes bajo transformaciones ortogonales.

5. Resultados y Discusión

a. Base de datos de Nueva Zelanda

El análisis que se presenta a continuación se efectuó utilizando ya el mallado 3D de los rostros de la base de Nueva Zelanda mencionado en la sección (2.a), se realizó el marcaje de los puntos (1 a 11 de la Tabla 2.1) en dos diferentes ocasiones, por el mismo sujeto.

Se obtuvieron las medidas (1 a 16 de la Tabla 2.2) y se promedió el resultado de las diferentes ocasiones, el valor del *TEM* para todas las mediciones fue menor a 1 mm, por lo tanto se consideran aceptables; las medidas que presentan mayor error son: altura facial total (0.93 mm), altura nasal (0.98 mm) y anchura bucal (0.98 mm); las que presentan menor error son: altura del labio inferior (0.29 mm), altura del labio superior (0.35 mm) y altura de la boca (0.40 mm).

A continuación se muestra el boxplot (diagrama de caja) de las distancias antropométricas (Figura 5.1), que proporciona información sobre la distribución de los datos, la caja representa el 25 % y 75 %, la línea roja el 50 % de los datos, y los bigotes el valor mínimo y máximo, así las cruces rojas representan valores atípicos en la distribución de los datos.

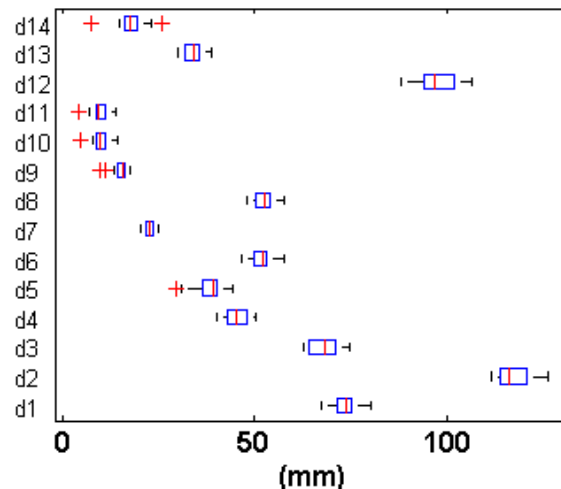


Figura 5.1. Boxplot de las distancias medidas.

Utilizando la información de las 14 distancias se lleva a cabo un análisis de componentes principales (PCA) del cual se obtuvieron 14 componentes principales, las primeras 6 componentes principales se muestran en la

Figura 5.2, de las cuales las primeras tres tienen una contribución del 66.75 % de la varianza total.

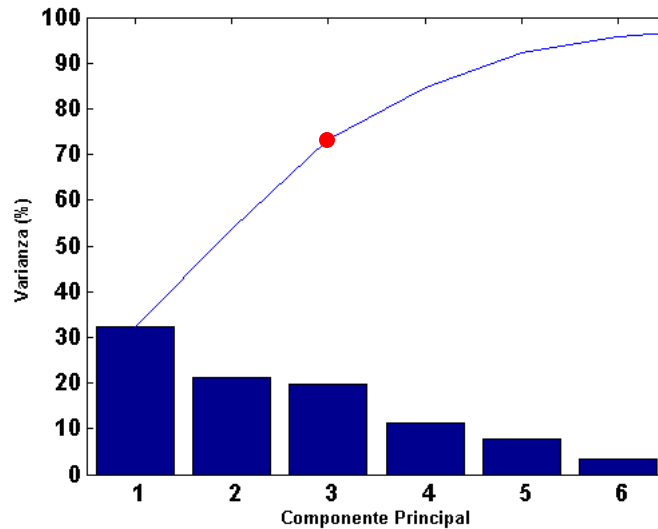


Figura 5.2. Contribución a la varianza total de las primeras siete componentes principales.

Para las tres primeras componentes principales (3D porque es el máximo que podemos visualizar) Figura 5.3, se muestra a manera de vector (sentido y magnitud) la contribución a la varianza de cada distancia a las tres componentes principales, representadas por los ejes. Los puntos rojos representan cada sujeto en el espacio de las 3 componentes.

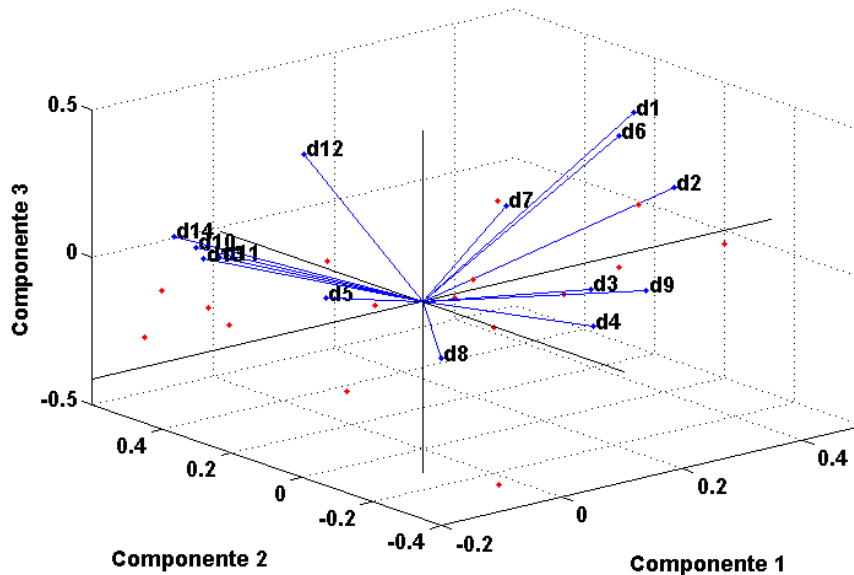


Figura 5.3. Contribución de cada distancia a las tres primeras componentes principales.

De lo que se obtiene que las distancias que presentan una mayor variación son: altura nasal (d6), altura facial superior (d1) y altura de la boca (d14). Las de menor variación son: anchura bucal (d8), anchura nasal (d5) y altura cutánea labial superior (d9).

Con la información de las distancias se realizó el cálculo los índices (1 a 20 de Tabla 2.3), y el boxplot correspondiente (Figura 5.4).

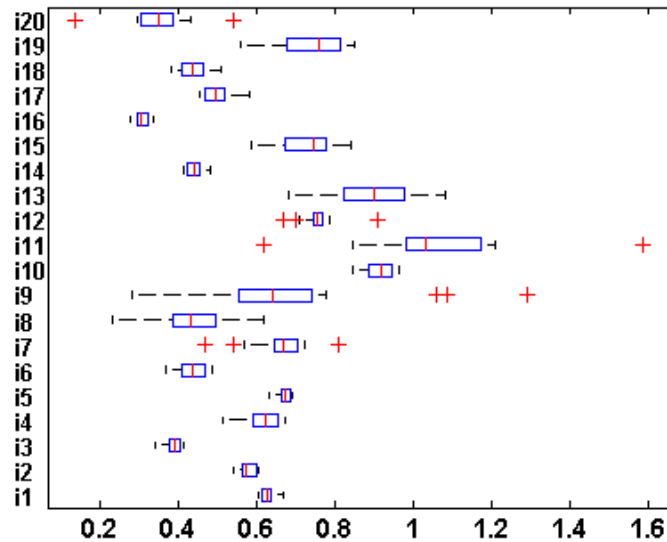


Figura 5.4. Boxplot de los índices calculados.

Posteriormente con la información de los 20 índices se lleva a cabo un análisis de componentes principales (PCA) del cual se obtienen 16 componentes principales, la contribución de los 3 primeros consiste en el 73.32 % de la varianza.

La contribución a la varianza de cada índice a las tres primeras componentes principales se muestra en la Figura 5.5.

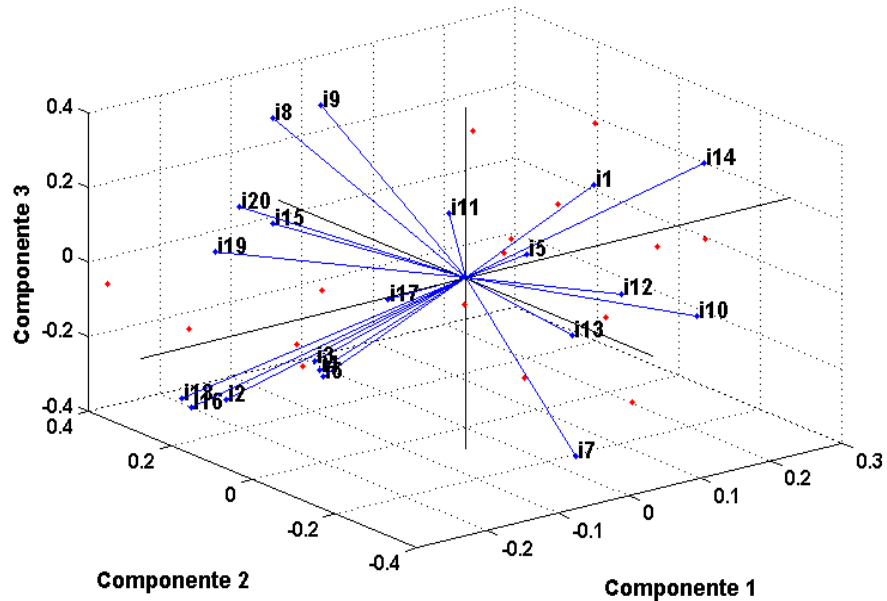


Figura 5.5. Contribución de cada índice a las tres primeras componentes principales.

De lo anterior se concluye que los índices que más varían en los sujetos neozelandeses son altura labial superior-mandibular (i17), altura bermellón-total labial superior (i8) y altura bermellón-cutánea labial superior (i9). Lo cual se refiere a que las disparidades entre estos sujetos se encuentran en la zona inferior del rostro, específicamente en su altura mandibular y altura labial superior.

Los índices que menos varían son altura facial superior-ancho binocular (i12), bermellón (i11) y ancho intercantal-nasal (i13). Las similitudes entre sujetos se encuentran en la anchura de sus ojos y altura labial.

Sin embargo la cantidad de sujetos y el desconocimiento sobre su edad, género y otros antecedentes hacen que estos resultados no sean conclusivos con esta base de datos de Nueva Zelanda, sin embargo sirvieron como un referente para obtener los rasgos faciales más y menos variantes dentro de una población. Su uso nos permitió desarrollar el protocolo de medición en lo que se diseñaba, construía y probaba el sistema de estereovisión; de hecho, los resultados preliminares con la base de Nueva Zelanda guiaron al propio protocolo, el diseño del sistema y las pruebas.

b. Base de datos de México

Se adquirieron a 35 sujetos (20 hombres y 15 mujeres), para los cuales se marcaron los landmarks de la Tabla 2.1 en dos diferentes ocasiones, por el mismo sujeto.

La localización de los landmarks se llevó a cabo como se menciona en la sección 2.d, teniendo mayor dificultad en los sujetos que ladearon su rostro hacia alguno de sus hombros pues el reflejo de la luz en estas circunstancias provocaba un ligero desplazamiento en la posición del tabique de su nariz y por tanto dificultaba el establecer la línea media del rostro. Así mismo sujetos con mejillas muy prominentes provocaban sombras en las comisuras de sus labios dificultando la localización del *chelion*.

En dos landmarks se tuvieron dificultades en su localización debido al diseño del sistema, el *gnation* se vio afectado debido a que la posición de las cámaras provoca en el frente una oclusión de la parte más sobresaliente del mentón sobre su parte inferior, y las imágenes laterales no son suficientes para reconstruir adecuadamente dicha región. El otro landmark que se vio afectado es el *nasion* ya que las imágenes de las laterales, a 90°, no logran “ver” la región del nacimiento de la nariz pues se ve ocluida por los arcos superciliares y las cejas.

Para resolver los problemas debidos al diseño del sistema se sugiere un arreglo que involucre más cámaras, un par frontal que logre “ver” la parte inferior del mentón y dos pares a $\pm 45^\circ$ del par frontal cubriendo así una mayor superficie del rostro.

A partir de los landmarks se tomaron las distancias antropométricas entre ellos indicadas de la Tabla 2.2, se promedió el resultado de los dos marcajes, el valor del *TEM* para todas las mediciones fue menor a 1 mm, por lo tanto se consideran aceptables; las medidas que presentan mayor error son: distancia de *chelion* derecho a *subnasal* (0.71 mm), anchura bucal (0.69 mm) y altura nasal (0.53 mm); las que presentan menor error son: anchura nasal (0.30 mm), anchura facial (0.34 mm) y altura de la boca (0.37 mm).

La Tabla 5.1 muestra los valores promedio de las distancias y el boxplot de la Figura 5.6 muestra como varían las distancias entre sujetos.

Distancia	Valor promedio		Valor promedio Mujeres		Valor promedio Hombres	
	(mm)	± (mm)	(mm)	± (mm)	(mm)	± (mm)
1	74	6	73	7	75	6
2	122	10	116	8	126	9
3	72	9	67	6	76	9
4	50	8	46	5	54	8
5	37	4	35	3	38	4
6	53	6	52	6	53	6
7	22	3	21	2	23	3
8	54	5	51	4	55	5
9	15	2	15	2	16	3
10	7	2	7	1	7	2
11	9	2	9	2	9	2
12	96	5	95	5	97	5
13	38	3	37	3	38	3
14	16	3	16	3	16	3
15	20	3	18	3	21	3
16	31	7	28	5	33	8
17	95	6	93	6	97	5
18	25	3	24	3	26	3
19	130	8	127	7	133	8
20	72	4	71	3	73	4
21	74	4	72	4	75	4
22	37	3	36	3	38	3
23	40	4	38	4	41	3
24	94	6	92	5	96	6
25	109	8	105	8	112	7
26	42	6	42	6	42	6
27	75	7	71	5	78	7

Tabla 5.1. Valores de distancia promedio.

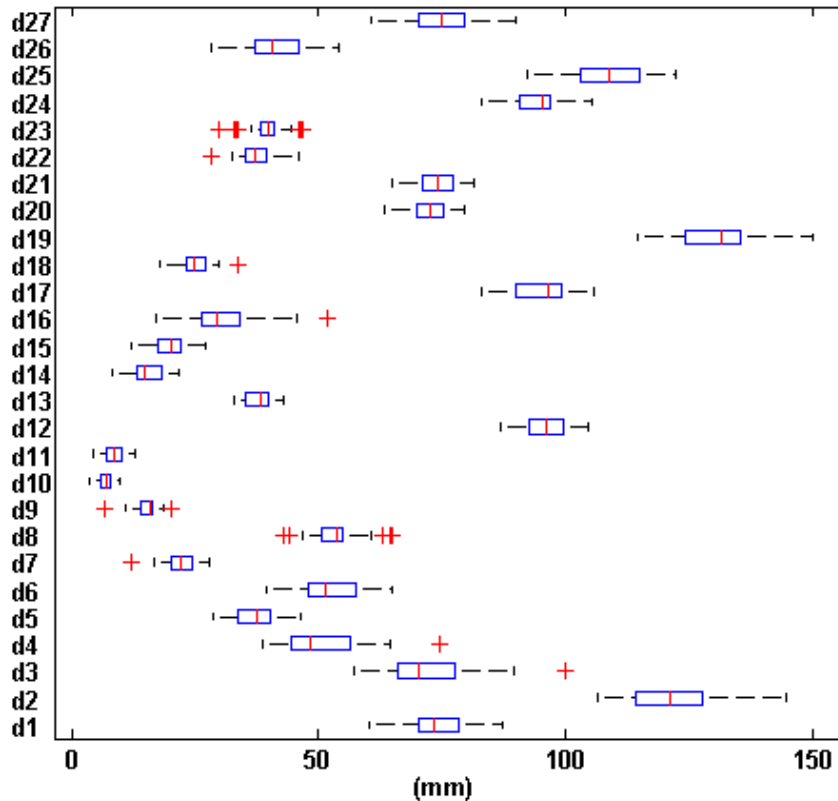


Figura 5.6. Boxplot de las distancias medidas.

Se calculó la correlación entre las distancias, es decir, aquellas que si una de ellas aumenta o disminuye la otra lo hace igualmente. La matriz de correlación se puede observar en la Figura 5.7, de la cual se obtuvo que las distancias con mayor correlación son:

- d24 con d17: distancia de *exocatio* izquierdo a labial inferior con la distancia de *exocatio* derecho a labial inferior.
- d3 con d4: altura facial inferior con la altura mandibular.
- d26 con d6: altura nasal con distancia de *nasion* a *pronasal*.

La correlación entre la distancia 24 y 17 es de esperarse pues se trata de la misma distancia únicamente que de lados opuestos.

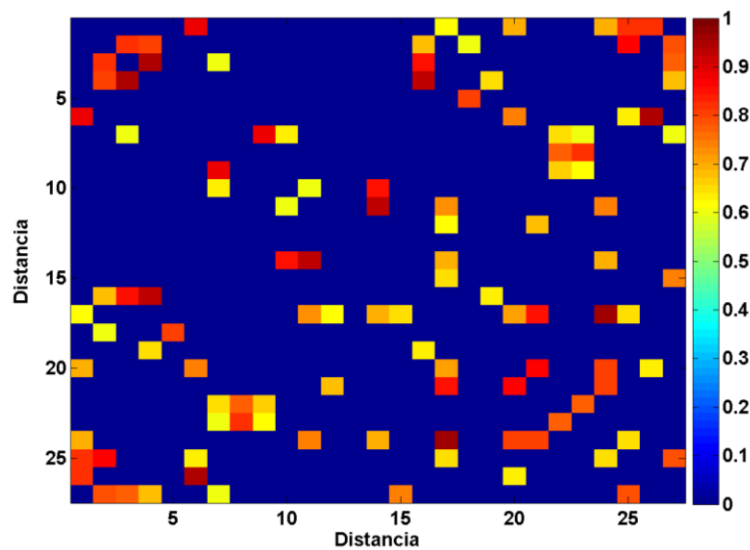


Figura 5.7. Matriz de correlación de las distancias.

Con los valores de las distancias se realiza PCA, obteniendo 27 componentes principales y las tres primeras suman un 68.43 % de la varianza total. La Figura 5.8 muestra la contribución de cada distancia a las tres primeras componentes.

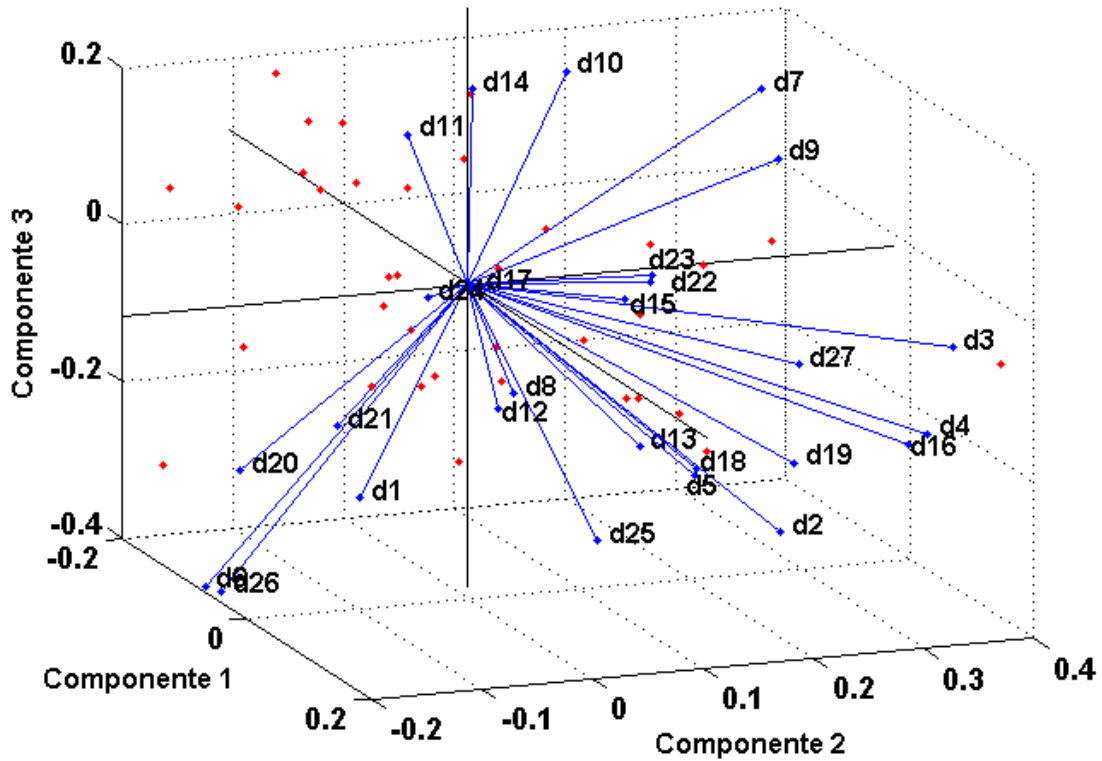


Figura 5.8. Contribución de cada distancia a las tres primeras componentes principales.

De analizar la mayor y menor contribución a la varianza de cada distancia se obtiene que las similitudes entre sujetos se encuentran en:

- d8: ancho bucal.
- d13: ancho intercantal.
- d12: ancho binocular.

Es decir, las similitudes entre sujetos son distancias horizontales en el rostro, el ancho entre los ojos y el de la boca.

Las disparidades entre sujetos se encuentran en:

- d6: distancia de *nasion* a *pronasal*.
- d26: altura nasal.
- d16: altura del mentón.

Estas son distancias verticales en el rostro, medidas a partir de landmarks sobre la nariz y el mentón.

Tomando las distancias anteriormente medidas se hace el cálculo de los índices de la Tabla 2.4, en la Figura 5.9 se muestra el boxplot correspondiente y en la Tabla 5.2 los valores promedio de los índices.

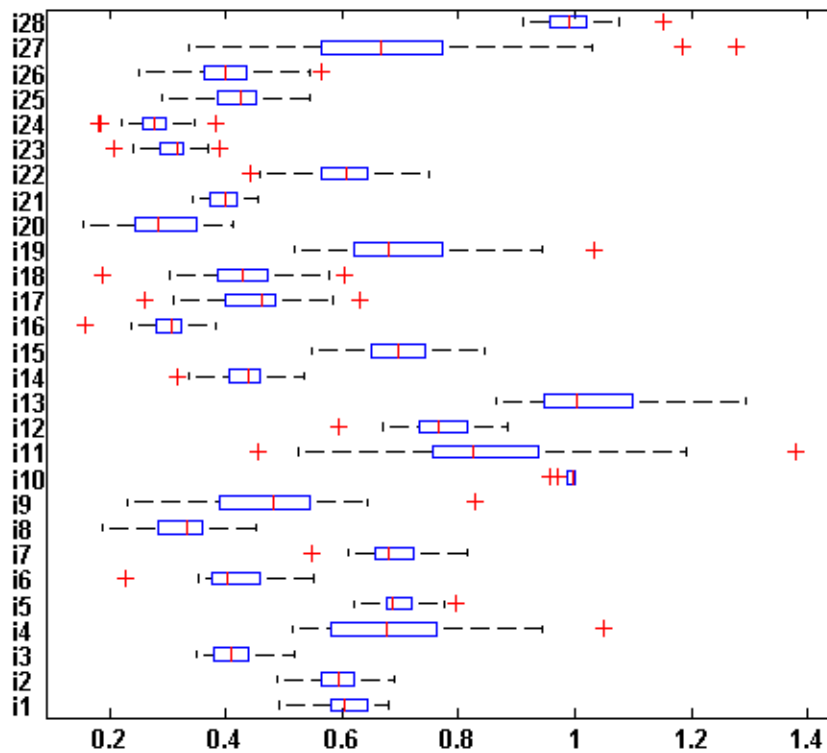


Figura 5.9. Boxplot de los índices calculados.

Índice	Valor promedio		Valor promedio Mujeres		Valor promedio Hombres	
		±		±		±
1	0.61	0.04	0.63	0.04	0.59	0.04
2	0.59	0.05	0.58	0.04	0.61	0.05
3	0.41	0.04	0.39	0.03	0.43	0.04
4	0.69	0.12	0.63	0.09	0.73	0.13
5	0.70	0.04	0.68	0.03	0.70	0.04
6	0.42	0.06	0.42	0.04	0.41	0.07
7	0.69	0.05	0.68	0.04	0.69	0.06
8	0.32	0.06	0.33	0.04	0.31	0.07
9	0.48	0.12	0.49	0.09	0.47	0.14
10	0.99	0.01	0.99	0.01	0.99	0.01
11	0.85	0.19	0.88	0.24	0.83	0.16
12	0.77	0.06	0.77	0.06	0.77	0.07
13	1.03	0.11	1.07	0.13	1.01	0.08
14	0.43	0.05	0.45	0.04	0.42	0.05
15	0.69	0.07	0.69	0.06	0.69	0.08
16	0.30	0.04	0.30	0.04	0.31	0.05
17	0.45	0.08	0.47	0.06	0.43	0.08
18	0.43	0.08	0.41	0.08	0.44	0.09
19	0.71	0.11	0.68	0.08	0.74	0.13
20	0.29	0.06	0.31	0.06	0.29	0.07
21	0.40	0.03	0.39	0.03	0.40	0.03
22	0.60	0.07	0.61	0.07	0.60	0.07
23	0.31	0.04	0.32	0.03	0.30	0.04
24	0.28	0.04	0.27	0.05	0.28	0.04
25	0.42	0.06	0.41	0.06	0.43	0.07
26	0.40	0.07	0.40	0.07	0.40	0.07
27	0.69	0.20	0.68	0.22	0.69	0.20
28	0.99	0.05	0.98	0.04	1.00	0.05

Tabla 5.2. Valores promedio de los índices calculados.

De la correlación entre los índices se obtiene la Figura 5.10 y de los valores obtenidos en esta se tiene que los índices con mayor correlación positiva son:

- i23 con i17: longitud labial superior con la altura labial superior-mandibular.
- i16 con i18: altura labial superior-facial superior con la altura labial superior-nasal.
- i3 con i4: altura mandibular-facial con la altura mandibular facial-superior.

Los índices con mayor correlación negativa, es decir, los que cuando uno varía el otro disminuye y viceversa, son:

- i22 con i26: altura mandibular-mentón con la altura labial inferior-mentón.
- i23 con i5: longitud labial superior con la altura mandibular-facial inferior.
- i5 con i17: altura mandibular-facial inferior con la altura labial superior-mandibular.

De aquí que los índices más correlacionados son los correspondientes a la parte inferior del rostro del *subnasal* al *gnation*.

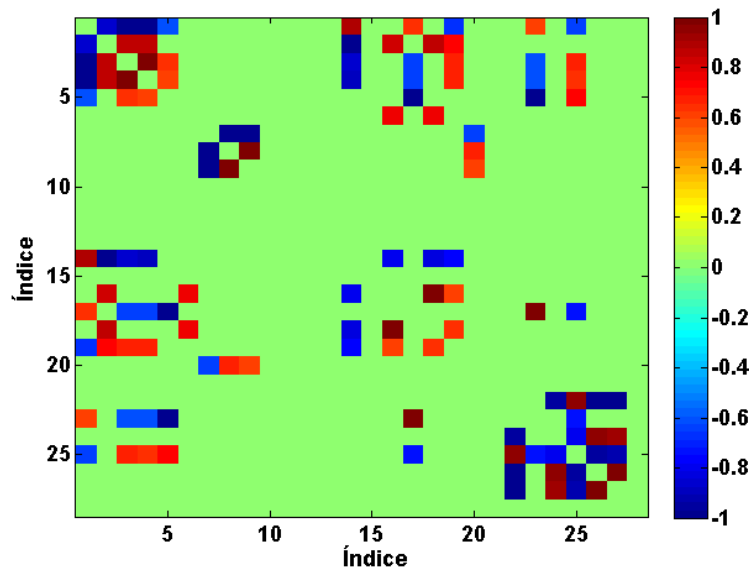


Figura 5.10. Matriz de correlación de los índices.

Realizando un PCA sobre la información de los índices se obtienen 28 componentes principales de las cuales las tres primeras contienen el 69.03 % de la varianza total, en la Figura 5.11 se muestra la contribución de cada índice a las tres primeras componentes.

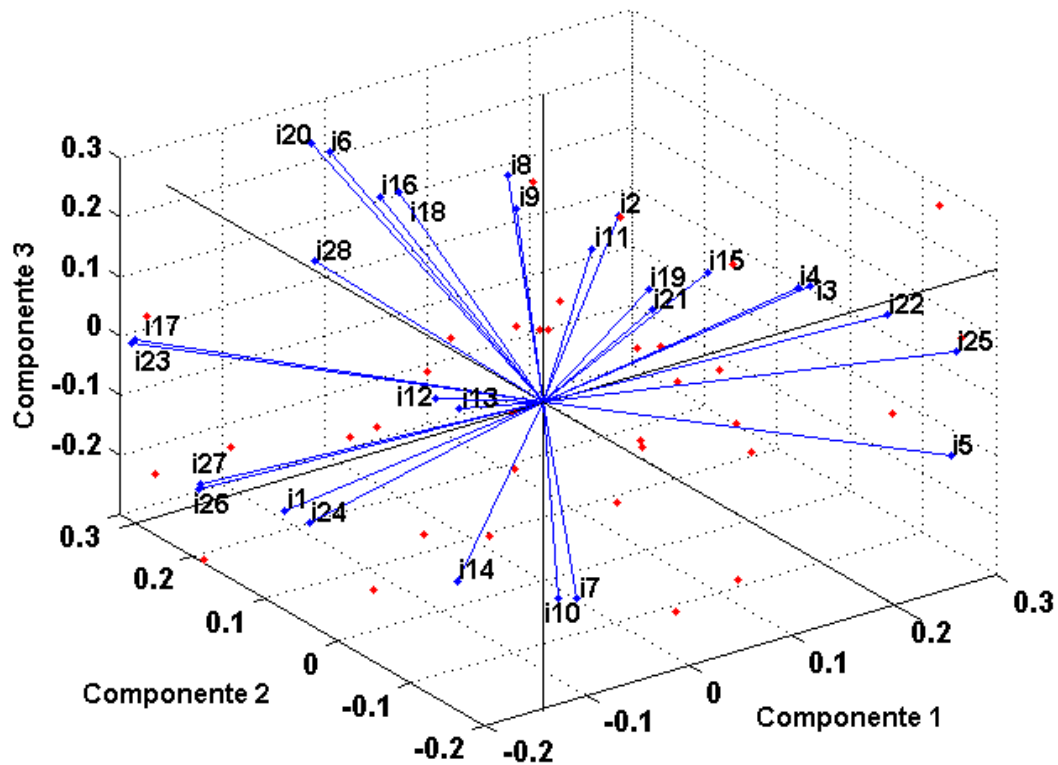


Figura 5.11. Contribución de cada índice a las tres primeras componentes principales.

De lo anterior se obtiene que los índices con una mayor contribución a la varianza, es decir, las disparidades son:

- i8: altura bermellón-total labial superior.
- i9: altura bermellón-cutánea labial superior.
- i7: altura cutánea-total labial superior.

De aquí que los índices en las que los sujetos son menos similares son aquellas que involucran las proporciones que involucran al labio superior.

Los índices con una mayor similitud son:

- i13: ancho intercantar-nasal.
- i21: intercantar.
- i12: altura facial superior-ancho binocular.

Las proporciones similares entre sujetos son las relacionadas con la distancia entre los ojos.

Utilizando los landmarks se midieron los ángulos propuestos en la Tabla 2.4 obteniendo los valores promedio presentados en la Tabla 5.3 y el boxplot de la Figura 5.12.

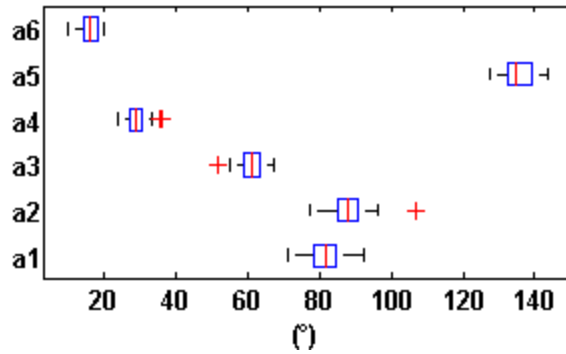


Figura 5.12. Boxplot de los ángulos calculados.

Ángulo	Valor promedio		Valor promedio Mujeres		Valor promedio Hombres	
	(°)	±(°)	(°)	±(°)	(°)	±(°)
1	82	4	82	3	81	5
2	88	6	88	4	89	6
3	61	3	62	3	60	4
4	29	3	29	3	29	2
5	135	4	135	4	135	4
6	16	3	16	2	15	3

Tabla 5.3. Valores promedio de los ángulos.

Se calcula la matriz de correlación entre los ángulos (Figura 5.13), así los ángulos con mayor correlación son:

- (positiva) a3 con a1: ángulo nasal-chelial con el ángulo labial-orbital.
- (negativa) a4 con a5: ángulo nasal-facial con el ángulo nasal-mentón.

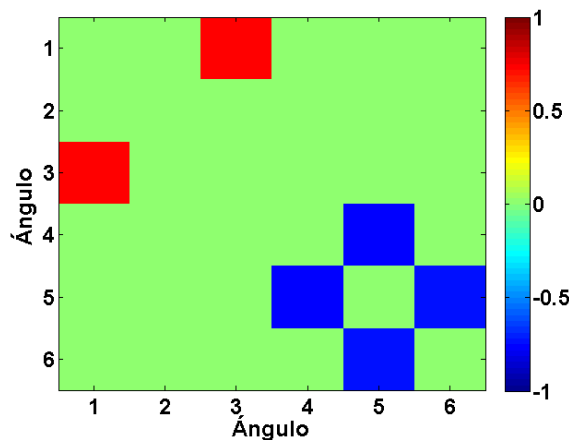


Figura 5.13. Matriz de correlación de los ángulos.

Con los valores de los ángulos se realiza un PCA, del que se obtienen 6 componentes principales y las primeras tres contienen el 91.65 % de la varianza total. La contribución a cada ángulo las tres primeras componentes se muestra en la Figura 5.14.

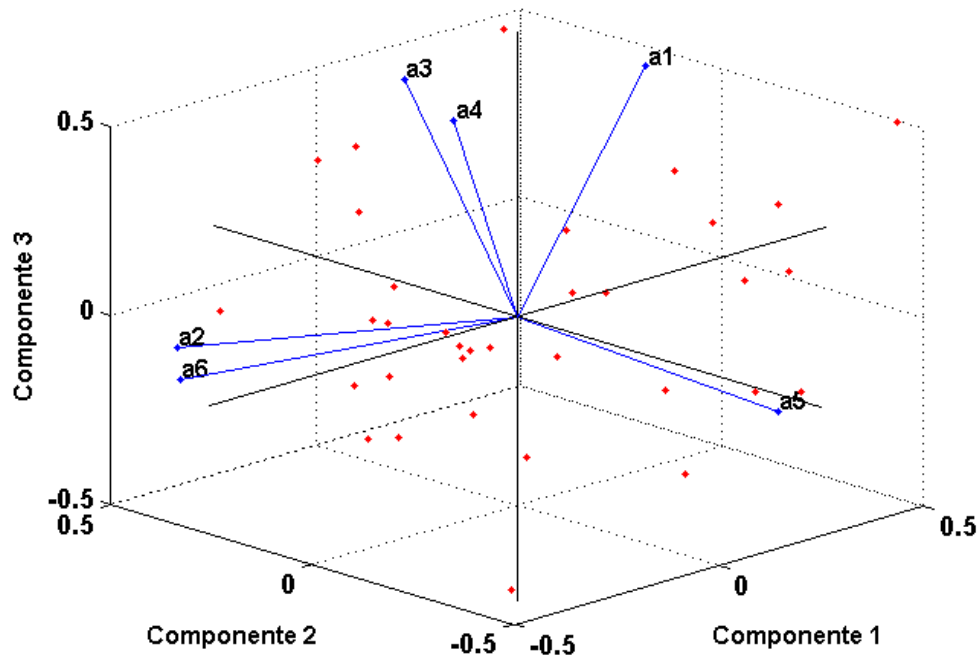


Figura 5.14. Contribución de cada ángulo a las tres primeras componentes principales.

El ángulo que es más similar en todos los sujetos es el ángulo mentón-facial (a6) y el que marca una diferencia es el ángulo nasal-orbital (a2). Lo cual es consistente con los resultados anteriores que indican mayores diferencias en la nariz de los sujetos y menores diferencias en la distancia entre los ojos.

Sin embargo el análisis anterior cuenta con pocos valores, así que como distancias y ángulos son medidos a partir de los landmarks se realiza a continuación el análisis involucrando a ambos, mejorando así los resultados obtenidos por PCA y con ello una mejor clasificación de los sujetos.

La Figura 5.15 muestra la matriz de correlación de ángulos y distancias, siendo los valores del 1 al 27 distancias y del 28 al 33 ángulos.

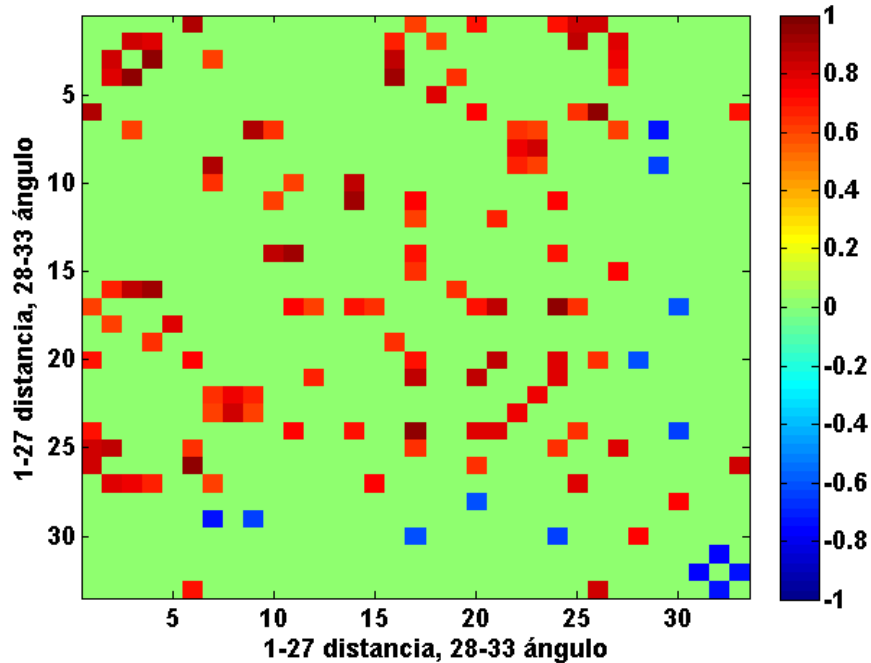


Figura 5.15. Matriz de correlación entre ángulos y distancias.

Los valores con una mayor correlación positiva son los mismos a los obtenidos en la matriz de correlación de distancia (Figura 5.6) y para los valores con una mayor correlación negativa son:

- a4 con a5: ángulo nasal-facial con el ángulo nasal-mentón.
- a2 con d7: ángulo nasal-orbital con la altura labial superior.
- a5 con a6: ángulo nasal-mentón con el ángulo mentón-facial.

La correlación mostrada entre ángulo es la esperada pues se trata del mismo triángulo, formado por el *nasion*, *pronasal* y el *pogonio*.

Realizando el PCA sobre la información de ángulos y distancias se obtienen 33 componentes principales, de las cuales las tres primeras contienen el 62.65 % de la varianza total, la contribución de las distancias y ángulos a las tres primeras componentes se muestran en la Figura 5.16.

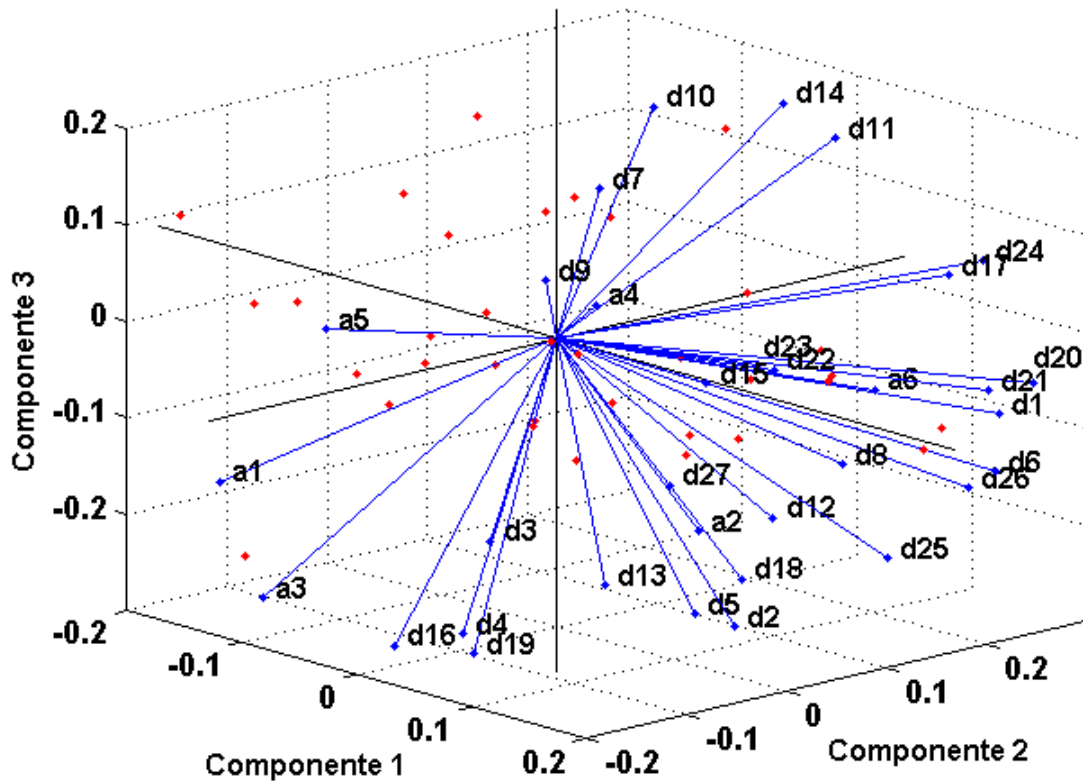


Figura 5.16. Contribución de las distancias y ángulos a las tres primeras componentes principales.

De este análisis más completo se obtiene que hay una mayor similitud en:

- a4: ángulo nasal-facial.
- a5: ángulo nasal-mentón.
- d16: altura del mentón.

Y hay una mayor disparidad en:

- d7: altura labial superior.
- d6: distancia de *nasion* a *pronasal*.
- d26: altura nasal.

De aquí se puede observar que un análisis con una mayor cantidad de información cambió los resultados obtenidos previamente, teniendo que el ángulo nasal facial ahora es una similitud y no una disparidad como se había encontrado previamente; pero en las disparidades se sigue manteniendo que es en el tercio facial inferior donde las encontramos.

Se realizó el mismo análisis separando en dos grupos a hombres y mujeres, de lo que concluyó lo siguiente:

Las correlaciones entre índices, distancias, ángulos y la combinación de los dos anteriores se mantienen igual respecto a la del grupo total.

Los rasgos más representativos para la similitud y la disparidad en hombres y mujeres que no se encontraron el grupo total se muestran en la Tabla 5.4, para las similitudes de los ángulos y distancias se obtuvieron los mismos resultados que para el grupo total.

		Mujeres	Hombres
Similitudes	Índices	○ altura bermellón-total labial superior	○ bermellón
	Distancias y ángulos	○ anchura intercantal	○ distancia stomion a sublabial
Disparidades	Distancias	○ altura del labio inferior	○ altura facial total
	Índices	○ longitud labial superior	○ bucal
	Ángulos	○ nasal-orbital	○ nasal-chelial
	Distancias y ángulos	○ altura facial inferior	○ anchura binocular

Tabla 5.4. Similitudes y diferencias para hombres y mujeres.

Con los valores anteriores se obtiene un análisis sobre la población para el cual se sabe qué rasgos son más similares entre ellos y cuáles son los que los diferencian.

6. Conclusiones

Mediante un sistema de multi-estereovisión fue posible la creación de modelos digitales en 3D del rostro. Estos modelos se utilizaron para la selección de puntos antropométricos y con ello extraer índices, distancias y ángulos relativos, sin necesidad de alinear entre sí los modelos. Se obtuvieron valores promedio de una población de sujetos sanos y se encontraron los rasgos que mantienen similitudes y diferencias entre ellos.

Una de las metas era la creación de un sistema portable y de bajo costo que pudiera ser utilizado para tomar fotografías en estéreo de sujetos para crear un modelo 3D para posterior uso por antropólogos y médicos sin que el sujeto esté presente. El usar cámaras de baja resolución, para mantener un bajo costo, repercutió en la necesidad de utilizar más iluminación y por lo tanto ocupar un mayor espacio, aumentando la complejidad del marcaje de los landmarks. Una conclusión es que el uso de cámaras con mayor resolución y un cambio en el diseño mejorarán sustancialmente el mallado y la precisión.

Los resultados obtenidos aunque son limitados por el número de sujetos muestran una tendencia sobre qué rasgos caracterizan las diferencias y semejanzas entre sujetos, una muestra de 50 sujetos o más (por género) es la que suele utilizarse en estudios antropológicos porque incluye una mayor variabilidad de sujetos. De igual forma se obtuvieron los valores promedio de los rasgos y su variabilidad. Las medidas tomadas durante este trabajo pueden ser aprovechadas y extendidas por médicos, forenses y antropólogos. Como la variabilidad es sobre rasgos diferentes, se utilizó el método de Análisis de Componentes Principales (PCA), que permite observar los modos de variación (rasgos en términos de índices) más importantes.

De los resultados se pudo concluir que los sujetos de este estudio comparten los rasgos relacionados con las distancias entre los ojos, el ancho de la nariz y la boca. Las diferencias entre estos sujetos se encuentran en la altura de la nariz, la altura del mentón y la altura de la región de la boca. Los rasgos evaluados son los comúnmente utilizados por los antropólogos para caracterizar las poblaciones y utilizarlas en disciplinas estéticas, médicas y forenses;

ejemplos de esto se han realizado en poblaciones asiáticas, caucásicas y africanas, no así en hispanos.

Adicionalmente se dividieron los sujetos en dos grupos, uno de hombres y uno de mujeres, de lo que se concluyó que entre las mujeres el rasgo compartido el ancho interior de los ojos, y en los hombres la altura del labio inferior. Los rasgos que representan una diferencia para las mujeres son la altura cutánea labial inferior y la distancia facial inferior, los hombres tienen mayor diferencia en la altura facial total y el ancho binocular.

Referencias:

Bush, K., and Antonyshyn, O., *Three-Dimensional Facial Anthropometry Using a Laser Surface Scanner: Validation of the Technique*, Plastic and Reconstructive Surgery, Vol. 98, No. 2, 1996, pp. 226-235

Dunteman, G.H., *Principal Component Analysis*, Series 69, Sage Publications, USA, 1989, pp. 7-34

Enciso, R., Shaw, A., Neumann, U., and Mah, J. *3D Head Anthropometric Analysis*, 2003

Edler, R., Agarwal, P., Wertheim, D. and Greenhill, D., *The use of anthropometric proportion indices in the measurement of facial attractiveness*, European Journal of Orthodontics, Vol. 28, 2006, pp. 274-281

Farkas, L. and Deutsch, C., *Anthropometric Determination of Craniofacial Morphology*, American Journal of Medical Genetics, Vol. 65, 1996, pp. 1-4

Frisancho, R., *Anthropometric Standards for the Assessment of Growth and Nutritional Status*, The University of Michigan Press, USA, 1990, pp. 29-30

Galantucci, L. M, Percoco, G., Di Gioia, E., *Photogrammetric 3D Digitization of Human Faces Based on Landmarks*, Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2009 Vol I IMECS 2009, March 18 - 20, Hong Kong, 2009

George, R., *Facial Geometry: Graphic Analysis for Forensic Artists*, Charles C. Thomas Publisher, LTD., 2007, pp. 3-17, 38-60

Ghoddousi, H., Edler, R., Haers, P., Wertheim, D. and Greenhill, D., *Comparison of three methods of facial measurement*, International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, Vol. 36, 2007, pp. 250-258

Hartley, R. and Zisserman, A., *Multiple View Geometry in computer vision*, Cambridge University Press, 2nd Edition, 2003, pp. 239-259

Jolliffe, I., *Principal Component Analysis*, Springer, 2nd Edition, USA, 2002, pp. 1-28

Kolar, J. and Saleter, E., *Craniofacial Anthropometry: Practical Measurement of the Head and Face for Clinical, Surgical and Research Use*, Charles C. Thomas Publisher, LTD., 1997, pp. 40-60

Kook, M., Jung, S., Park, H., Oh, H., Ryu, S., Cho, J., Lee, J., Yoon, S., Kim, M. and Shin, H., *A comparison study of different facial soft tissue analysis methods*, Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery, Elsevier, Vol. 42, 2014, pp. 648-656

Liu, Z. and Zhang, Z., *Face Geometry and Appearance Modeling: Concepts and Applications*, Cambridge University Press, 2011, pp. 77-80

Mendonca, D., Naidoo, S., Skolnick, G., Skladman, R. and Woo, A., *Comparative Study of Cranial Anthropometric Measurement by Traditional Calipers to Computed Tomography and Three-dimensional Photogrammetry*, The Journal of Craniofacial Surgery, Vol. 24, Number 4, 2013, pp. 1106-1110

Menezes, M., Rosati, R., Allievi, C. and Sforza, C., *A Photographic System for the Three-Dimensional Study of Facial Morphology*, Angle Orthodontist, Vol. 79, No. 6, 2009, pp. 1070-1077

Metzler, P., Sun, Y., Zemmann, W., Bartella, A., Lehner, M., Obwegeser, J., Kruse-Gujer, A. and Lübbers, H., *Validity of the 3D VECTRA photogrammetric surface imaging system for cranio-maxillofacial anthropometric measurements*, Oral and Maxillofacial Surgery, Vol. 18, 2014, pp. 297-304

Naini, F., *Facial Aesthetics: Concepts and Clinical Diagnosis*, John Wiley and Sons, UK 2011, pp. 127-128

Ozsoy, U., Demirel, B., Yildirim, F., Tosun, O. and Sarikcioglu, L., *Method Selection in craniofacial measurements: Advantages and disadvantages of 3D digitization method*, Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery, Vol. 37, 2009, pp. 285-290

Plataniotis, K., and Venetsanopoulos, A., *Color Image Processing and Applications (Digital Signal Processing)*, Springer, Germany, 2000, pp. 30-31

Preedy, V., *Handbook of Anthropometry: Physical Measurements of Human Form in Health and Disease*, Springer, London, UK, 2012, p. 613

Rapp, H., *Reconstruction of Specular Reflective Surfaces using Auto-Calibrating Deflectometry*, KIT Scientific Publishing, Germany, 2012, pp. 14-15

Serrano, C., Villanueva, M., Luy, J. y Link, K., *El proyecto "La cara del mexicano". Un sistema de retrato hablado asistido por computadora para la población Mexicana*, Boletín de enlaces, Coordinación de Humanidades, UNAM, México, 1997, pp. 26-28

Sforza, C. and Ferrario, V., *Soft-tissue facial anthropometry in three dimensions: from anatomical landmarks to digital morphology in research, clinics and forensic anthropology*, Journal of Anthropological Sciences, Vol. 84, 2006, pp. 97-124

Shlens, J., *A tutorial on Principal Component Analysis*, University of California, San Diego, 2005

Sifakis, E., Selle, A., Rbinson-Mosher, A. y Fedkiw, R., *Simulating speech with a physics-based facial muscle model*, In M.Cani, editor, In ACM SIGGRAPH/Eurographics Symp. on Computer Animation, Eurographics Association, 2006, pp 261–270.

Swennen, G., Schtyser, F. and Hausamen, J., *Three-Dimensional Cephalometry: A Color Atlas and Manual*, Springer, Germany, 2006, pp. 184-185

Szeliski, R., *Computer Vision: Algorithms and Applications*, Springer, UK, 2011, pp. 347-352, 537-540

Wong, J., Oh, A., Ohta, E., Hunt, A., Rogers, G., Mulliken, J. and Deutsch, C., *Validity and Reliability of Craniofacial Anthropometric Measurement of 3D Digital Photogrammetric Images*, Cleft Palate-Craniofacial Journal, Vol. 45, No. 3, 2008, pp. 232-239

Woodward, A., Delmas, P., Gimel'farb, G., Márquez, J., *Low Cost Virtual Face Performance Capture Using Stereo Web Cameras. PSIVT 2007: 763-776*, Santiago de Chile, Dec. 17-19, 2007. Proceedings Springer LNCS Vol. 4872, pp. 763-776

Woodward, A., Delmas, P., Chan, Y., Gastelum, A., Gimel'farb, G. and Marquez, J., *An interactive 3D video system for human facial reconstruction and expression modeling*, Journal of Visual Communication and Image Representation, Vol. 23, 2012, pp 1113-1127

Xu, G. and Zhang, Z., *Epipolar Geometry in Stereo, Motion and Object Recognition. An Undefined Approach*, Springer Science+Bussines Media, The Netherlands, 1996, pp. 7-69

Zhang, Z., *Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane From Unknown Orientations*, The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Sept. 20-27, 1999. IEEE, Vol. 1, pp. 666-673

Sitios en línea:

Anthrogloss:

<http://ovrt.nist.gov/projects/vrml/h-anim/landmarkInfo.html>

Último acceso: 5 de Noviembre del 2014

Online Computational Stereo Vision:

https://www.i.v.s.auckland.ac.nz/quick_stereo/index.php

Último acceso: 5 de Noviembre del 2014

Camera Calibration Tool Box *for Matlab*®:

http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/

Último acceso: 5 de Noviembre del 2014

Apéndices

i. Formato de datos del paciente

El sujeto proporciona la siguiente información:

Datos del sujeto:

Nombre completo:

Edad y género:

Peso y estatura:

Ha sufrido alguna fractura o cirugía en el rostro, le han diagnosticado algún síndrome. En caso de que su respuesta sea afirmativa, mencionar cuál:

Hay un algún extranjero en su línea ancestral de tres generaciones (es decir, entre sus padres, abuelos y padres de abuelos), en caso de ser afirmativo mencionar nacionalidad y parentesco.

ii. Carta de consentimiento

Carta de consentimiento

Participantes sanos

Proyecto de tesis de la Maestría en Ciencias (Física Médica), Instituto de Física, UNAM

“Moformetría facial en poblaciones sanas mediante un sistema de estereovisión”

Investigadores:

Fís. Leticia del Pilar López Tabares

Dr. Alfonso Gastélum Strozzi

Dr. Jorge Alberto Márquez Flores

Dirección:

CCADET (Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico), Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria C.P. 04510 Del. Coyoacán, D.F., México

Introducción:

Se le invita a participar en un estudio de investigación en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico e Instituto de Investigaciones Antropológicas. El participar en este estudio es completamente voluntario. Usted podrá decidir no tomar parte, o abandonar el estudio en cualquier momento.

Características del estudio:

En este estudio se le ofrece obtener una adquisición 3D de su rostro. El propósito es validar un sistema de adquisición de tal manera que las mediciones obtenidas por él sean equivalentes a las tomadas por un experto en antropometría. El sistema cuenta con tres pares de cámaras, un par al frente y dos a cada lado abarcando toda la superficie de su rostro, se basan en la estereovisión para reconstruir las fotografías tomadas en una superficie en 3D.

Adquisición de imágenes:

Se llevarán en el CCADET en el Laboratorio de Análisis de Imágenes y Visualización.

Previamente deberá llenar un formulario que contiene datos personales que permitirá asignarlo en uno de los diferentes grupos de estudio que se manejarán.

Para esta adquisición se necesita estar afeitado, sin maquillaje, traer el cabello recogido hacia atrás, deberá quitarse cualquier accesorio como lentes, piercings, collares y pendientes. La razón es que su rostro y orejas deben estar completamente descubiertas para captar la superficie total de su rostro.

El procedimiento consta en sentarse cómodamente con la mirada al frente y expresión facial neutra. Se le proyectará un patrón de luz con ayuda de dos proyectores sobre el rostro que ayudará a la reconstrucción de sus imágenes. Es importante que al momento de la toma de imágenes permanezca con los ojos abiertos, sin realizar gesticulación ni movimientos bruscos.

Confidencialidad:

Toda la información proporcionada será manejada de tal manera que no permitirán su identificación por nombre completo. En caso de que los resultados de esta investigación fueran presentados en congresos o reuniones médicas científicas elija si desea que su identidad sea revelada (únicamente sus imágenes del rostro).

Si ____

No ____

El interesado declara:

“He leído la hoja de información y entiendo de qué se trata el estudio, acepto voluntariamente participar en este estudio. Entiendo que puedo suspender mi participación en cualquier momento. Mi identidad no será revelada en ninguna referencia del estudio o resultados a menos que indique lo contrario.”

Nombre y firma del sujeto

____ / ____ /2014

Nombre y firma del investigador que atiende

____ / ____ /2014

iii. Algoritmo de adquisición

```
#ifdef _MSC_VER
#define _CRT_SECURE_NO_WARNINGS
#endif
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <iostream>
#include <string>
#include <sstream>
#include <windows.h>
#include <tchar.h>

#include <CLEyeMulticam.h>

#include "opencv2\highgui\highgui_c.h"
#include "opencv2\imgproc\imgproc_c.h"
#include "opencv2\legacy\compat.hpp"

double GetRandomNormalized()
{
    return (double)(rand() - (RAND_MAX >> 1)) / (double)(RAND_MAX >> 1);
}

class CLEyeCameraCapture{
    int _counter;
    CHAR _windowName[256];
    CHAR _dir[256];
    GUID _cameraGUID;
    CLEyeCameraInstance _cam;
    CLEyeCameraColorMode _mode;
    CLEyeCameraResolution _resolution;
    float _fps;
    HANDLE _hThread;
    bool _running;
    IplImage * _pCapImageOLD;

public:
    CLEyeCameraCapture(LPSTR windowName, LPSTR dirName, GUID
cameraGUID, CLEyeCameraColorMode mode, CLEyeCameraResolution resolution, float fps) :
        _cameraGUID(cameraGUID), _cam(NULL), _mode(mode),
        _resolution(resolution), _fps(fps), _running(false)
    {
        strcpy(_windowName, windowName);
        strcpy(_dir, dirName);
        _counter = 0;
        _pCapImageOLD = NULL;
    }
}
```

```

bool StartCapture()
{
    _running = true;
    cvNamedWindow(_windowName, CV_WINDOW_AUTOSIZE);
    // Start CLEye image capture thread
    _hThread = CreateThread(NULL, 0,
&CLEyeCameraCapture::CaptureThread, this, 0, 0);
    if (_hThread == NULL)
    {
        MessageBoxA(NULL, "Could not create capture thread",
"CLEyeMulticamTest", MB_ICONEXCLAMATION);
        return false;
    }
    return true;
}
void StopCapture()
{
    if (!_running) return;
    _running = false;
    WaitForSingleObject(_hThread, 1000);
    cvDestroyWindow(_windowName);
}
void IncrementCameraParameter(int param)
{
    if (!_cam) return;
    printf("CLEyeGetCameraParameter %d\n",
CLEyeGetCameraParameter(_cam, (CLEyeCameraParameter)param));
    CLEyeSetCameraParameter(_cam, (CLEyeCameraParameter)param,
CLEyeGetCameraParameter(_cam, (CLEyeCameraParameter)param) + 10);
}
void DecrementCameraParameter(int param)
{
    if (!_cam) return;
    printf("CLEyeGetCameraParameter %d\n",
CLEyeGetCameraParameter(_cam, (CLEyeCameraParameter)param));
    CLEyeSetCameraParameter(_cam, (CLEyeCameraParameter)param,
CLEyeGetCameraParameter(_cam, (CLEyeCameraParameter)param) - 10);
}
void Run()
{
    int w, h;
    IplImage *pCapImage;
    IplImage *pCapImageDest;
    IplImage *pCapImageDestGrey;
    CvScalar average;
    CvScalar std_dev;

    PBYTE pCapBuffer = NULL;

```



```

        // Create camera instance
        _cam = CLEyeCreateCamera(_cameraGUID, _mode, _resolution, _fps);
        if (_cam == NULL) return;
        // Get camera frame dimensions
        CLEyeCameraGetFrameDimensions(_cam, w, h);
        // Depending on color mode chosen, create the appropriate OpenCV image
        if (_mode == CLEYE_COLOR_PROCESSED || _mode ==
CLEYE_COLOR_RAW)

cvAbsDiff(pCapImage, _pCapImageOLD, pCapImageDest);
        if (pCapImage)
        {
            _pCapImageOLD = cvCloneImage(pCapImage);
        }

        cvCvtColor(pCapImageDest, pCapImageDestGrey,
CV_BGR2GRAY);

        cvAvgSdv(pCapImageDestGrey, &average, &std_dev);

        //printf("nonzero %f\n", std_dev.val[0]);
        if (std_dev.val[0] > 0.75)
        {
            std::string filename;
            std::stringstream ss;
            _counter = _counter + 1;
            ss << _counter;
            filename = _dir + ss.str() + ".bmp";
            cvShowImage(_windowName, pCapImage);
            if (_counter > 10)
            {
                cvSaveImage(filename.c_str(), pCapImage);
            }
        }
    }
}

```

iv. Algoritmo del controlador Arduino

```
int ledPin = 9;    // LED connected to digital pin 9

int val = 0;      // variable to store the read value

int time = 0;

void setup()

{
  pinMode(ledPin, OUTPUT); // sets the pin as output
}

void loop()

{
  if (val == 0)
  {
    val = 168;
    time = 4000;
  }

  else

  {
    val = 0;
    time = 200;
  }

  analogWrite(ledPin, val); // analogRead values go from 0 to 1023, analogWrite values
from 0 to 255

  delay(time);
}
```

v. Elección del patrón proyectado

Para elegir el patrón a proyectar sobre el rostro, para una mejor reconstrucción, fue necesario realizar pruebas que consistieron en proyectar patrones con texturas y colores distintos hasta elegir el más adecuado (Figura A.1).

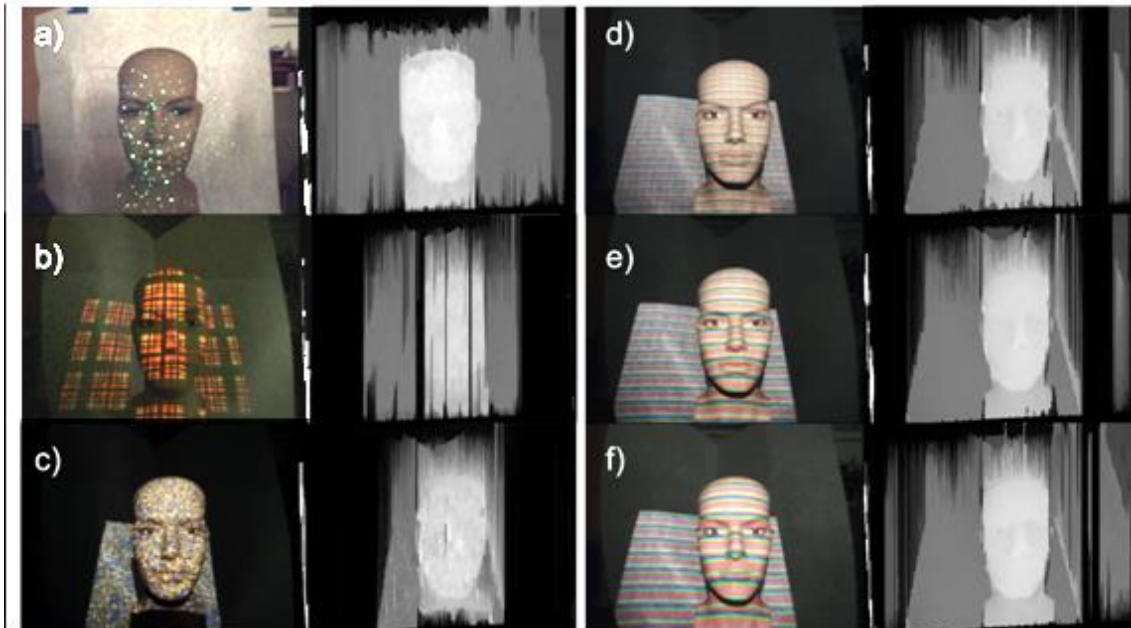


Figura A.1. Patrones proyectados sobre el rostro. a) puntos con láser, b) patrón de cuadros, c) puntos aleatorios, d) líneas de 2 píxeles de grosor, e) líneas de 3 píxeles de grosor, f) líneas de 4 píxeles de grosor.

De lo anterior se concluyó que el patrón con líneas horizontales provee una mejor reconstrucción debido a que el sistema de estereovisión puede encontrar los puntos de coincidencia en áreas de menor tamaño que están delimitadas por las líneas. De estos patrones de líneas se obtuvo el mejor resultado con las líneas de 3 píxeles.

Este patrón se obtuvo con el código que se presenta a continuación, eligiendo que los colores consecutivos fueran opuestos en el cono del sistema de color HSV (Platanotis et al, 2000). Se realizaron patrones de líneas con anchos desde un píxel hasta diez píxeles.

```

clear
Ziselm = [1080 1920 3];
ditbpoint = 15;
sizepoint = 15;

hsv_image = zeros(Ziselm);

%fondo
hsv_image(:,:,1) = 0.0;
hsv_image(:,:,2) = 0.0;
hsv_image(:,:,3) = 0.0;

%puntos
count=sizepoint;
signo=-1;

color=0;

hueval=[0,250,150,25,285,326,167];
hueval=hueval/360;
imagenum=0;

rgb_image = hsv2rgb(hsv_image);
filename=strcat('C:\patrones',num2str(imagenum),'.png');
imwrite(rgb_image, filename)

for reng = 1:5:50,
    count=reng;
    for idrow = 1:size(hsv_image,1),
        count=count+1;
        if (count == reng+1)
            if (color == 7)
                color=1;
            else
                color=color+1;
            end
            count=0;
        end
        hsv_image(idrow,:,1) = hueval(1,color);
        hsv_image(idrow,:,3) = 1.0;

        sval = 0.4;
        for idcol = 1:size(hsv_image,2),
            if(sval >= 0.9)
                sval = 0.5;
            else
                sval = sval+0.1;
            end
            hsv_image(idrow,idcol,2) = sval;
        end
    end
    rgb_image = hsv2rgb(hsv_image);
    imagenum=imagenum+1;
    filename=strcat('C:\patrones\horizontalval',num2str(imagenum),'.png');
    imwrite(rgb_image, filename)
end

```

vi. Elección del algoritmo de reconstrucción

Se dispone de diferentes algoritmos de reconstrucción, se sugirió inicialmente el uso del *parallel BM+DP*, sin embargo a manera de verificación se obtuvo el mapa de disparidad utilizando todos los algoritmos disponibles en el Online Computational Stereo Vision (Figura A.2).

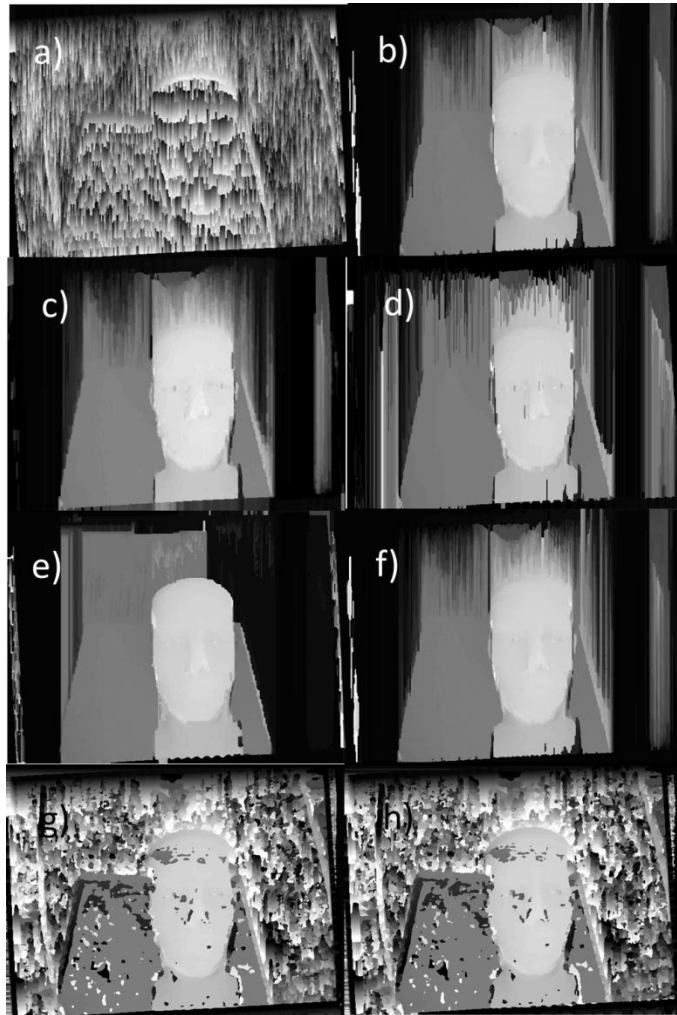


Figura A.2. Mapas de disparidad utilizando diferentes algoritmos de reconstrucción: a) belief propagation, b) *BM+DP*, c) coloured SDPS, d) dynamic programming, e) *GC+DP*, f) *parallel BM+DP*, g) SAD, h) SSD.

Se concluye que los algoritmos *GC+DP* y *parallel BM+DP*, son los que logran un mejor resultado para el objeto que estamos reconstruyendo, por lo tanto se decidió mantener el uso del *parallel BM+DP*.

vii. Algoritmo de creación del mallado

```
clear
p = mfilename('fullpath');
[programdir,name,ext] = fileparts(strcat(p, '.mat'));

addpath(genpath(strcat(programdir, '\libs')));
load (fullfile(programdir, 'calib', 'stereoParams_f.mat'));
ft = stereoParams_f.TranslationOfCamera2;
fxo = ft(1);
fyo = ft(2);
fzo = ft(3);
fR = stereoParams_f.RotationOfCamera2;

%list of directories
list = dir(strcat(programdir, '\database'));
listd = [list(:).isdir];
directorios = {list(listd).name};
directorios(ismember(directorios, {'.', '..'})) = [];

for diridx = 1: size(directorios, 1)
    imagesdir = strcat(programdir, '\database\', directorios(diridx, 1), '\');

    %frente
    % Read in the stereo pair of images.
    I1 = imread(char(strcat(imagesdir, 'arriba_f.bmp')));
    I2 = imread(char(strcat(imagesdir, 'abajo_f.bmp')));
    Mcorrection = readtable(char(strcat(imagesdir, 'val.dat')));

    % Rectify the images.
    [J1_f, J2_f] = rectifyStereoImages(I1, I2, stereoParams_f);

    disparityMap = disparity(rgb2gray(J1_f), rgb2gray(J2_f));

    pointCloud_f = reconstructScene(disparityMap, stereoParams_f);

    clear vector_f vector_ld vector_li vector_T;

    vector_f(:, 1) = reshape(pointCloud_f(:, :, 1), ...
        [size(pointCloud_f, 1)*size(pointCloud_f, 2), 1]);
    vector_f(:, 2) = reshape(pointCloud_f(:, :, 2), ...
        [size(pointCloud_f, 1)*size(pointCloud_f, 2), 1]);
    vector_f(:, 3) = reshape(pointCloud_f(:, :, 3), ...
        [size(pointCloud_f, 1)*size(pointCloud_f, 2), 1]);
    vector_f(:, 4) = reshape(J1_f(:, :, 1), ...
        [size(J1_f, 1)*size(J1_f, 2), 1]);
    vector_f(:, 5) = reshape(J1_f(:, :, 2), ...
        [size(J1_f, 1)*size(J1_f, 2), 1]);
    vector_f(:, 6) = reshape(J1_f(:, :, 3), ...
        [size(J1_f, 1)*size(J1_f, 2), 1]);

    vector_f(:, 1:3) = vector_f(:, 1:3)*fR;
```

```

vector_f(:,1) = vector_f(:,1) - fxo;
vector_f(:,2) = vector_f(:,2) + fyo;
vector_f(:,3) = vector_f(:,3) + fzo;

%Lateral Derecho
% Read in the stereo pair of images.
I1 = imread(char(strcat(imagesdir,'arriba_Id.bmp')));
I2 = imread(char(strcat(imagesdir,'abajo_Id.bmp')));

% Rectify the images.
[J1_d, J2_d] = rectifyStereoImages(I1, I2, stereoParams_Id);
disparityMap_Id = disparity(rgb2gray(J1_d), rgb2gray(J2_d));
pointCloud_Id = reconstructScene(disparityMap_Id, stereoParams_Id);

vector_Id(:,1) = reshape(pointCloud_Id(:,:,1),...
    [size(pointCloud_Id,1)*size(pointCloud_Id,2), 1]);
vector_Id(:,2) = reshape(pointCloud_Id(:,:,2),...
    [size(pointCloud_Id,1)*size(pointCloud_Id,2), 1]);
vector_Id(:,3) = reshape(pointCloud_Id(:,:,3),...
    [size(pointCloud_Id,1)*size(pointCloud_Id,2), 1]);
vector_Id(:,4) = reshape(J1_d(:,:,1),...
    [size(J1_d,1)*size(J1_d,2), 1]);
vector_Id(:,5) = reshape(J1_d(:,:,2),...
    [size(J1_d,1)*size(J1_d,2), 1]);
vector_Id(:,6) = reshape(J1_d(:,:,3),...
    [size(J1_d,1)*size(J1_d,2), 1]);

vector_Id(:,1:3) = vector_Id(:,1:3)*fdR;

vector_Id(:,1) = vector_Id(:,1) + fdxo;
vector_Id(:,2) = vector_Id(:,2) + fdyo;
vector_Id(:,3) = vector_Id(:,3) + fdzo;

%correcciones manuales
% Para el lateral derecho
lxc = Mcorrection(1,2).val;
lyc = Mcorrection(2,2).val;
lzc = Mcorrection(3,2).val;
tethax = Mcorrection(4,2).val;
tethay = Mcorrection(5,2).val;
tethaz = Mcorrection(6,2).val;
R=rotx(tethax)*roty(tethay)*rotz(tethaz);
t = [lxc; lyc; lzc];
Rt = cat(2,R,t);
Rt = cat(1,Rt,[0,0,0,1]);
TempR=vector_Id(:,1:3);
TempR=TempR';
TempR(4,:) =1;
OuputTId = Rt*TempR(:,:);
OuputTId=OuputTId';
vector_Id(:,1) = OuputTId(:,1);
vector_Id(:,2) = OuputTId(:,2);
vector_Id(:,3) = OuputTId(:,3);

```

```

% Para el lateral izquierdo
...

%clean the data
listnan = find(any(isnan(vector_f), 2)==1);
vector_f(listnan,:)=[];
listnan = find(any(isnan(vector_Id), 2)==1);
vector_Id(listnan,:)=[];
listnan = find(any(isnan(vector_li), 2)==1);
vector_li(listnan,:)=[];

vector_f(vector_f(:,3)<Mcorrection(13,2).val | vector_f(:,3)>Mcorrection(14,2).val,:)=[];
vector_Id(vector_Id(:,3)<Mcorrection(15,2).val | vector_Id(:,3)>Mcorrection(16,2).val,:)=[];
vector_li(vector_li(:,3)<Mcorrection(17,2).val | vector_li(:,3)>Mcorrection(18,2).val,:)=[];

%detect all points that are closed to the frontal face and delete them
vector_T = cat(1,vector_f,vector_Id,vector_li);

pointclouddir = strcat(programdir,'\pointcloud\');

a=size(vector_T,1);
fl = fopen(char(fullfile(pointclouddir, strcat(diretorios(diridx,1),'_T.ply'))), 'w');
fprintf(fl, 'ply\n');
fprintf(fl, 'format ascii 1.0\n');
fprintf(fl, 'element vertex %f\n', a);
fprintf(fl, 'property float x\n');
fprintf(fl, 'property float y\n');
fprintf(fl, 'property float z\n');
fprintf(fl, 'property uchar red\n');
fprintf(fl, 'property uchar green\n');
fprintf(fl, 'property uchar blue\n');
fprintf(fl, 'end_header\n');
fprintf(fl, '%g %g %g %g %g %g \n', vector_T);
fclose(fl);
end

batchdir = strcat(programdir,'\batch');
batchdiredited = strrep(batchdir, '\', '\\');
fl = fopen(char(fullfile(batchdir,'meshbatch1.bat')), 'w');

fprintf(fl, 'rem Switch to the working directory\n');
fprintf(fl, 'C:\n');
string = char(strcat({'cd '},batchdiredited,'\n'));
fprintf(fl, string);

fprintf(fl, 'rem inputFolder\n');
pointclouddir = strcat(programdir,'\pointcloud');
pointclouddiredited = strrep(pointclouddir, '\', '\\');
string = char(strcat({'@set inputFolder='},pointclouddiredited,'\n'));
fprintf(fl, string);
fprintf(fl, 'rem mesh format\n');
fprintf(fl, '@set inputMeshFormat=ply\n');

```



```

fprintf(fl, 'rem Output mesh format\n');
meshdir = strcat(programdir, '\mesh');
meshdiredited = strrep(meshdir, '\', '\\');
string = char(strcat('@set outputFolder=', meshdiredited, '\n'));
fprintf(fl, string);
fprintf(fl, '@set outputMeshFormat=wrl\n');

fprintf(fl, 'rem rem MLX script file variables\n');
fprintf(fl, '@set mlxScriptFile=scriptpctomesh.mlx\n');
scriptsdir = strcat(programdir, '\batch\scripts');
scriptsdiredited = strrep(scriptsdir, '\', '\\');
string = char(strcat('@set mlxScriptFolder=', scriptsdiredited, '\n'));
fprintf(fl, string);

fprintf(fl, 'rem OM Output Mesh Options\n');
fprintf(fl, '@set outputMeshOptions=-om vc vn \n');

fprintf(fl, 'rem meshlabserver folder\n');
fprintf(fl, '@set meshlabserverPath="C:\\Program
Files\\VCG\\MeshLab\\meshlabserver.exe"\n');

fprintf(fl, 'echo Input Folder Mesh List:\n');
fprintf(fl, 'for %%%X in (%%inputFolder%%\*.%%inputMeshFormat%%) do (echo
"%%%%X")\n');

fprintf(fl, 'cd %%inputFolder%%');

fprintf(fl, 'echo run script\n');
fprintf(fl, 'for %%%I in (%%inputFolder%%\*.%%inputMeshFormat%%) do
(%%meshlabserverPath%% -i %%%I -o
%%outputFolder%%\%%~nI.%%outputMeshFormat%% -s
%%mlxScriptFolder%%\%%mlxScriptFile%% %%outputMeshOptions%%)\n');

fprintf(fl, 'rem Go back down a directory\n');
fprintf(fl, 'cd ..\n');
fprintf(fl, 'echo.\n');
fprintf(fl, 'echo.\n');
fprintf(fl, 'echo.\n');

fprintf(fl, 'rem List the Output Meshes\n');
fprintf(fl, 'echo.\n');
fprintf(fl, 'echo Output Folder Mesh List:\n');
fprintf(fl, 'for %%%X in (%%outputFolder%%\*.*) do (echo "%%%%X")\n');

fprintf(fl, 'echo.\n');
fprintf(fl, 'echo Script Complete\n');
fprintf(fl, 'echo.\n');

fclose(fl);

cd (batchdir)
!meshbatch1.bat

```

viii. Algoritmo de análisis antropométrico

```
header0={'g';'n';'en der'; 'en izq'; 'ex der'; 'ex izq';... };

clear
dirroot='C:\Caras';
cd(dirroot);
dirinfo=dir();
dirinfo(~[dirinfo.isdir])=[];
tf=ismember ({dirinfo.name},{',';'\'});
dirinfo(tf)=[];
subdirinfo=cell(size(dirinfo,1),1);
size (dirinfo,1);
for K=1 : size (dirinfo,1)
    thisdir=dirinfo(K).name;
    subdirinfo{K}=dir(fullfile(thisdir, '*.landmarkAscii'));
end
for K=1 : size (dirinfo,1)
    thisdir=dirinfo(K).name;
    filename=fullfile(thisdir,subdirinfo{K,1}.name);
    asciidata=importdata(filename,' ',14);
    facelandmarks{K,1}=asciidata.data;
end

sujetos = size (dirinfo,1);

header1={'n-sto'; 'n-gn';'sn-gn';'sto-gn';'al-al';'n-sn';... };

for K=1 : size (dirinfo,1),

    colnum=1;

    %n-sto
    indice1=2;
    indice2=11;
    distancias(K,colnum)=sqrt(...
        (facelandmarks{K,1}(indice1,1)-
        facelandmarks{K,1}(indice2,1))^2 ...
        +(facelandmarks{K,1}(indice1,2)-
        facelandmarks{K,1}(indice2,2))^2 ...
        +(facelandmarks{K,1}(indice1,3)
        facelandmarks{K,1}(indice2,3))^2);
    colnum=colnum+1;

    ...
end

%evaluación error en las medidas
for j=1:sujetos/2
    for i=1:colnum
        d(j,i) = distancias(2*j,i)-distancias((2*j-1),i);
    end
end
end
```

```

d2=d.^2;

for i=1:colnum;
    suma = sum (d2);
end

header2={'n-sto/n-gn';'sn-gn/n-gn';'sto-gn/n-gn'; ...};

j=1;

%upper face – face height
ind1=1;
ind2=2;
indice(:,j)=distancia(:,ind1)./distancia(:,ind2);
j=j+1;

...
end

%PCA
header3={'1';'2';'3';'4';'5';'6';'7';'8';'9';'10';'11'; ...
'12'; '13';'14';'15';'16';'17';'18';'19';'20'};

sujeto={'1';'2';'3';'4';'5';'6';'7';'8';'9';'10';'11'; ...
'12'; '13';'14';'15';'16'};

figure()
boxplot(indice,'orientation','horizontal','labels',header3)

C=corr(indice,indice);

w = 1./var(indice);
[wcoeff,score,latent,tsquared,explained]=pca(indice,...
'VariableWeights',w);

c3=wcoeff(:,1:3);

coefforth=diag(sqrt(w))*wcoeff;

c3=coefforth(:,1:3);

l=c3*c3;

cscores=zscore(indice)*coefforth;

figure()
pareto(explained)
xlabel('Principal Component')
ylabel('Variance Explained (%)')

figure()
biplot(coefforth(:,1:3),'scores',score(:,1:3), ...
'obslabels',sujeto,'varlabels',header3);

```