



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS**

---

---

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y  
APLICADAS**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS  
APLICADAS**

**Retrato Hablado Mediante sistemas lineales**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y  
CIENCIAS APLICADAS**

**Presenta**

**MARTHA EDALI BARREIRO ORTIZ**

**DIRECTOR(ES): DR. OMAR PALILLERO SANDOVAL**

**CODIRECTOR: DR. ROBERTO ALAN BELTRÁN VARGAS**

**CUERNAVACA, MORELOS**

**FEBRERO, 2026**



## **Resumen**

Reconociendo que a un sistema lineal permite la aplicación del principio de superposición, este trabajo plantea el uso de la transformada de Fourier como herramienta para la generación automatizada de retratos hablados, con el objetivo de optimizar los procesos de identificación personas en contextos de seguridad y criminalística, particularmente en la región mexicana. Esta investigación parte de la hipótesis de que los patrones faciales pueden descomponerse y combinarse linealmente, permitiendo representar un rostro como la suma de componentes básicos (ojos, nariz, boca, estructura facial, etc.). Se propone el desarrollo de una aplicación interactiva, se busca que las víctimas de un delito puedan seleccionar, entre combinaciones generadas automáticamente, aquella que más se asemeje al agresor, eliminando la necesidad de un experto operador, sin embargo, las aplicaciones van más allá. En esta fase inicial, el sistema se limitará a 7 variantes por cada tipo de rasgo facial, permitiendo un número significativo de combinaciones. Este enfoque, tanto técnico y como social, busca mejorar los procesos de denuncia e identificación, empoderando a las víctimas e introducir innovaciones en los métodos tradicionales de elaboración de retratos hablados.

## **Abstract**

Recognizing that the linear systems allow the application of the superposition principle, this work proposes the use of the Fourier transform as a tool for the automated generation of composite sketches, aimed at enhancing person identification processes in security and criminal investigation contexts,

particularly within the Mexican region. The study is based on the hypothesis that facial patterns can be decomposed into elementary components and combine linearly, allowing the representation of a face as the weighted sum of basic elements (eyes, nose, mouth, facial structure, etc.). An interactive application is proposed to allow victims to select, from automatically generated combinations, the one that most closely resembles the aggressor, thereby reducing reliance on expert operators. In this initial phase, the system will be limited to seven variants for each feature type, which nonetheless results in a significant number of possible combinations. If preliminary results prove favorable, a progressive expansion of the facial database is planned. This technical and social approach seeks to improve reporting and identification procedures, empowering victims, and introduce innovations to traditional methods of composite sketch creation.

## **Agradecimientos**

Agradezco profundamente a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo brindado a través de la beca que hizo posible la realización de mis estudios de posgrado y el desarrollo de esta investigación. Su respaldo fue fundamental para dedicarme plenamente a este trabajo académico.

Expreso mi sincero agradecimiento a mis asesores de tesis, por su invaluable orientación, dedicación y guía técnica durante todo el proceso de investigación. Sus observaciones, conocimientos y compromiso fueron esenciales para el diseño metodológico, la implementación del procesamiento de imágenes y la validación experimental del proyecto.

Agradezco también al Centro de Investigación en Ingenierías y Ciencias aplicadas (CIICAP) por ofrecer un entorno académico de excelencia, así como por facilitar el acceso a los recursos tecnológicos y científicos necesarios para la culminación de este trabajo.

Mi gratitud se extiende a mis profesores y compañeros, quienes con su apoyo, comentarios y discusiones académicas enriquecieron mi comprensión sobre los sistemas lineales, la Transformada de Fourier y sus aplicaciones en el ámbito forense.

De manera especial, deseo agradecer a mi familia, por su apoyo incondicional, comprensión y paciencia. Su confianza y fortaleza fueron el motor que me impulsó a concluir este proyecto.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, directa o indirectamente, contribuyeron al desarrollo de esta tesis. Cada orientación, colaboración y palabra de aliento fueron piezas clave para lograr los resultados presentados en este trabajo.

# Índice

Resumen .....	2
Abstract.....	2
Agradecimientos .....	4
Índice .....	5
Lista de Tablas .....	8
Lista de Figuras .....	9
<b>CAPITULO 1: ANTECEDENTES .....</b>	<b>11</b>
1.1 Introducción.....	11
1.2 Estado del arte .....	13
1.2.1 Los avances en Reconocimiento Facial y Criminalística.....	13
1.2.2 Desafíos en el Reconocimiento Facial.....	21
1.2.3 Avances Tecnológicos .....	21
1.2.4 Aplicaciones en Criminalística .....	22
1.2.5 Desafíos y Direcciones Futuras .....	23
1.2.6 MX Investigaciones y Aplicaciones en México .....	24
1.2.7 Aplicaciones de la Transformada de Fourier en Reconocimiento Facial .....	27
1.3 Planteamiento del problema .....	30
1.4 Justificación.....	31
1.5 Hipótesis .....	32
1.6 Objetivos .....	33
<b>CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>37</b>
2.1 Teoría Fundamental .....	37
2.1.1 Fundamentos del Procesamiento Digital de Imágenes .....	38
2.1.1.1 Definición y objetivos del procesamiento de imágenes .....	39
2.1.1.2 Representación digital de una imagen. ....	40
2.1.2 Sistemas Lineales y Principio de Superposición .....	41
2.1.2.1 Concepto de sistema lineal.....	41
2.1.2.2 Propiedades de linealidad y superposición .....	42
2.1.3 Transformada de Fourier en Imágenes Digitales .....	43
2.1.3.1 Fundamentos matemáticos de la Transformada de Fourier bidimensional... 43	
2.1.3.2 Ejemplo: análisis de textura y bordes mediante FFT.....	44

2.1.4 Filtros Espaciales .....	45
2.1.4.1 Concepto y clasificación .....	45
2.1.4.2 Filtros lineales y no lineales .....	45
2.1.4.3 Filtros de realce (Sobel, Prewitt, Laplaciano, Dodge & Burn, Canny, XDoG y Pencil Sketch) .....	46
2.1.5 Filtros Frecuenciales .....	56
2.1.5.1 Introducción y fundamento matemático .....	56
2.1.5.2 Interpretación del espectro de frecuencias .....	56
2.1.5.3 Filtros pasa bajas, pasa altas y pasa banda .....	57
2.1.5.4 Implementación de filtros frecuenciales .....	59
2.1.5.5 Uso de ventana de Hann para eliminar bordes artificiales .....	71
2.1.6 Fundamento teórico, propiedades de traslación, escalado y convolución .....	72
2.1.7 Comparativo en Clasificación Facial .....	75
2.1.7.1 Sistema de referencia cefalométrico .....	76
2.1.8 Fusión de Partes Faciales .....	78
2.1.8.1 Suma de imágenes filtradas en frecuencia (principio de superposición) .....	78
2.1.9 Aplicación de la Transformada de Fourier a cada parte facial .....	79
2.1.10 Retorno al dominio espacial .....	79
2.2 Nueva Sistema a desarrollar .....	81
2.2.1 Clasificación de tipos de rostros y partes de rasgos faciales .....	82
2.2.2 Aplicaciones en la detección de bordes y rasgos faciales .....	85
2.2.3 Aplicación en la reconstrucción de imágenes .....	86
2.2.3.1 Combinación de funciones (partes faciales) .....	86
2.2.3.2 Aplicación de la convolución en el ensamblaje facial .....	87
2.2.3.3 Ventajas de usar traslación y escala con puntos cefalométricos .....	87
2.2.4 Comparativa con métodos actuales .....	88
<b>CAPÍTULO 3 DESARROLLO TEÓRICO/ EXPERIMENTAL .....</b>	<b>95</b>
3.1 Equipo .....	95
3.2 Materiales: lenguaje de programación, librerías .....	96
3.3 Métodos .....	98
3.3.1 Descripción del diagrama del proceso de reconstrucción .....	98
3.3.2 Diagramas de Flujo Retrato hablado mediante sistemas lineales .....	100
3.3.2.1 Diagrama de flujo del 1. Preprocesamiento e implementación en Python ..	101
3.3.2.2 Diagrama de flujo de 2. Clasificación de tipos de rostro y partes de rasgos faciales .....	102

3.3.2.3 Diagrama de flujo 3. Ejecución de Filtrado .....	104
3.3.2.4 Diagrama de flujo 4. Restauración y generación de rostros.....	110
<b>CAPITULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>115</b>
4.1 Resultados Fase I: Preprocesamiento de Imágenes Faciales .....	115
4.2 Resultados Fase II: Filtrado Espacial .....	119
4.2.1 Comparativa visual entre filtros Canny, Dodge & Burn, XDoG y Pencil Sketch..	119
4.2.2 Análisis cualitativo por filtro.....	126
4.3 Resultados Fase III. Fusión de Partes Faciales.....	127
4.3.1 Interfaz de usuario.....	129
4.3.2 Reconstrucción de retrato hablado en Interfaz de usuario (Ejemplos).....	132
4.4 Validación Experimental.....	135
4.4.1 Diseño experimental .....	135
4.4.2 Justificación del método y parámetros.....	142
<b>CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>145</b>
5.1 Conclusiones.....	145
5.2 Recomendaciones.....	149
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>151</b>
<b>APÉNDICES .....</b>	<b>156</b>
Apéndice I.....	156
Apéndice II.....	157
Apéndice III.....	161
Apéndice IV.....	165
Apéndice V.....	169
Apéndice VI.....	180
Apéndice VII.....	180
Apéndice VIII.....	181
<b>ANEXOS .....</b>	<b>184</b>
Anexo 1. Participación en Congreso Nacional de Física y Póster.....	184
Anexo 2. Participaciones en taller o curso para la retribución social.....	186

## Lista de Tablas

Tabla 1. Comparación sistemas tradicionales vs. propuesta de tesis .....	16
Tabla 2. Tabla comparativa aplicaciones de TF en reconocimiento facial vs. propuesta de tesis.....	28
Tabla 3. Filtros frecuenciales más usados para detección de bordes (y para efecto “line art”).....	59
Tabla 4. Parámetros sugeridos $D_0$ y $n$ según aplicación .....	62
Tabla 5. Comparativa de métodos actuales para retrato hablado .....	89
Tabla 6. Acciones y resultados de la funcion <code>def_suma_imagenes_dominio_frecuencial (parts_data: list):</code> .....	112
Tabla 7. justificación teórica superposición en dominios espacial y frecuencial .....	113
Tabla 8. Correspondencia de puntos cefalométricos entre plantilla y partes faciales.....	118
Tabla 9. Tabla comparativa filtrado espacial tipo rostro (pelo).....	120
Tabla 10. Tabla comparativa filtrado espacial tipo rostro (Cejas) .....	121
Tabla 11. Tabla comparativa filtrado espacial tipo rostro (Ojos) .....	121
Tabla 12. Tabla comparativa filtrado espacial tipo rostro (Nariz) .....	122
Tabla 13. Tabla comparativa filtrado espacial tipo rostro (Boca) .....	123
Tabla 14. Tabla comparativa filtrado espacial tipo rostro (Mentón) .....	124
Tabla 15. Tabla comparativa filtrado espacial tipo rostro (Orejas).....	125
Tabla 16. Evaluación cualitativa de filtros para retrato hablado .....	126
Tabla 17. Tipos de rostro y clasificación de partes del rostro (hombre/ mujer) .....	129
Tabla 18. Reconstrucción de retrato hablado en Interfaz de usuario (ejemplos hombres).....	133
Tabla 19. Reconstrucción de retrato hablado en Interfaz de usuario (ejemplos mujeres) .....	134

Tabla 20. Resultados de métricas objetivas de calidad de bordes Energía de bordes, Densidad de trazos y Contraste.....	138
Tabla 21. Ajuste de parámetros para detección de trazos finos.....	143

## Lista de Figuras

Fig. 1 Puntos cefalométricos [34].....	78
Fig. 2 Diagrama de metodología de Retrato hablado mediante sistemas lineales.....	82
Fig. 3 Clasificación de tipos de partes del rostro.....	84
Fig. 4 Comparación visual del método propuesto vs. otros métodos.....	92
Fig. 5 Diagrama Retrato hablado mediante sistemas lineales.....	99
Fig. 6 Diagrama de Flujo Retrato hablado mediante sistemas lineales.....	100
Fig. 7 Diagrama de flujo 1 Preprocesamiento.....	101
Fig. 8 Diagrama de flujo 2 Clasificación de tipos de rostro y partes de rasgos faciales.....	102
Fig. 9 Diagrama de flujo 3 Ejecución de Filtrado.....	104
Fig. 10 Diagrama de flujo 4 Restauración facial mediante superposición lineal y reconstrucción en dominio espacial a partir de la Transformada Inversa de Fourier.....	110
Fig. 11 Vista de interfaz de usuario.....	131
Fig. 12 Grafica métrica: Energía de Bordes.....	138
Fig. 13 Grafica métrica: Densidad de trazos%.....	140
Fig. 14 Grafica métrica: Contraste.....	141



## **CAPITULO 1: ANTECEDENTES**

Este capítulo contextualiza el uso del retrato hablado en criminalística, destacando sus limitaciones tradicionales. Se propone un enfoque alternativo fundamentado en la teoría de sistemas lineales y la aplicación de la Transformada de Fourier, orientado a incrementar la precisión y la consistencia en la reconstrucción facial. Se revisan los avances recientes en reconocimiento facial automatizado y la integración de técnicas de inteligencia artificial en la generación de rostros, así como los desarrollos nacionales en bases de datos y sistemas digitales. Finalmente, se define el planteamiento del problema, la hipótesis de investigación, los objetivos generales y específicos del proyecto.

### **1.1 Introducción**

Durante décadas, el retrato hablado a constituido una herramienta fundamental en las ciencias forenses, particularmente en el ámbito de la criminalística, al servir como un recurso visual para la identificación de sospechosos basado en la memoria y descripción verbal de testigos o víctimas. A pesar del avance en tecnologías como el reconocimiento facial automatizado, el retrato hablado sigue siendo crucial en contextos donde no se cuenta con evidencia audiovisual del hecho delictivo. En contextos como el mexicano, donde los índices de inseguridad continúan siendo una preocupación relevante, contar con herramientas que mejoren los procesos de identificación de personas se vuelve indispensable.

Tradicionalmente, el proceso de elaboración de un retrato hablado ha dependido en gran medida de un dibujante experto o de un técnico especializado, quien interpreta verbalmente las características físicas

descritas por la víctima para producir un boceto visual. Sin embargo, esta metodología puede verse limitada por la subjetividad del operador, por posibles sesgos, y por la dificultad de comunicación efectiva entre víctima y experto. En este trabajo se propone una innovación metodológica centrada en el uso de sistemas lineales y la aplicación de la Transformada de Fourier como herramientas analíticas para automatizar y optimizar este proceso.

El principio de superposición, característico de los sistemas lineales, permite concebir el rostro humano como una combinación ponderada de patrones básicos (ojos, nariz, boca, estructura facial, etc.). Estos patrones, tratados como funciones, pueden ser combinados y transformados mediante operaciones lineales que faciliten su procesamiento digital. Al emplear la transformada de Fourier, es posible analizar y sintetizar retratos hablados desde el dominio de la frecuencia, permitiendo no solo una representación más eficiente, sino también una manipulación más controlada y precisa de sus componentes.

Este enfoque técnico se complementa con una metodología centrada en el usuario: el desarrollo de una aplicación interactiva que permita a la víctima del incidente seleccionar, entre múltiples combinaciones generadas automáticamente, aquella que más se asemeje a su memoria visual del agresor. En esta primera fase del trabajo, se limitará la base de datos a ocho tipos por cada parte del rostro, de las cuales son: 1) cabello, 2) ojos, 3) cejas, 4) nariz, 5) boca, 6) mentón, 7) orejas, lo que conlleva a un número considerable de combinaciones. Sin embargo, si los resultados obtenidos demuestran ser positivos, el sistema puede escalarse y enriquecerse progresivamente con más variantes para mejorar su precisión. Este cambio de paradigma —donde el control del proceso pasa del perito a la víctima— no solo pretende mejorar la exactitud del retrato resultante, sino también empoderar a quien ha sido afectado, integrándolo activamente en el proceso de justicia.

Así, este trabajo busca combinar fundamentos matemáticos y tecnológicos con una perspectiva humana y social, contribuyendo al fortalecimiento de mecanismos de seguridad pública mediante soluciones accesibles, precisas y centradas en el usuario.

## **1.2 Estado del arte**

En los últimos años, el reconocimiento facial ha emergido como una de las herramientas más innovadoras y controversiales dentro del ámbito de la criminalística, en particular cuando se trata de aplicaciones forenses y retrato hablado. Diversos estudios internacionales han contribuido a robustecer la literatura científica en torno a esta tecnología, destacando tanto sus avances como sus desafíos.

### **1.2.1 Los avances en Reconocimiento Facial y Criminalística**

Entre los desarrollos más recientes se incluyen revisiones exhaustivas sobre el reconocimiento facial multimodal y su aplicación en autenticación biométrica. Así mismo, se han implementado soluciones basadas en redes generativas adversariales (GAN) para la generación y el reconocimiento en contextos forenses, así como estudios que analizan el impacto de la inteligencia artificial en la mejora de imágenes y su influencia en la precisión del reconocimiento facial en investigaciones criminales [1], [2], [3].

Técnicas de mejora de imágenes impulsadas por inteligencia artificial afectan la precisión del reconocimiento facial en contextos forenses. Concluyendo que, si bien estas técnicas pueden mejorar la calidad visual, también pueden introducir artefactos que afectan negativamente la identificación precisa [4], [5].

Otros estudios presentan un sistema que integra generación y reconocimiento facial para aplicaciones forenses. Utilizando redes generativas adversariales (GANs), se generan rostros sintéticos que ayudan en la identificación de sospechosos cuando las imágenes disponibles son de baja calidad [1]

Asimismo, investigaciones recientes en visión por computadora y reconocimiento facial han explorado técnicas de fusión de características y estrategias de preprocesamiento para incrementar la robustez del reconocimiento bajo variaciones de iluminación, pose y expresión [3].

Por otro lado, se han explorado los avances en reconstrucción 3D de rostros, destacando su potencial aplicación forense y los retos para su implementación legal práctica [6]. Investigadores han demostrado cómo el reconocimiento facial puede ser complementado con biometría suave —como edad, género y etnia— para mejorar el rendimiento en entornos no controlados [7] y cómo la integración en investigaciones policiales puede mejorar la eficiencia y precisión en la identificación de sospechosos [4].

El estudio concluye que, si bien las técnicas de mejora y preprocesamiento de imágenes pueden incrementar la calidad visual, también pueden introducir artefactos que afecten negativamente la precisión del reconocimiento automático. En aplicaciones operativas y policiales, estos efectos deben evaluarse cuidadosamente para evitar degradaciones en la identificación biométrica [3].

En el contexto latinoamericano, también se han documentado iniciativas orientadas al desarrollo de sistemas de retrato hablado asistido por computadora, enfocados en apoyar procesos de identificación criminal mediante herramientas digitales de composición facial [8].

En investigaciones realizadas por CENATAV (Centro de Aplicaciones de Tecnologías de Avanzada) se destaca la importancia de técnicas en aplicaciones de seguridad y criminalística, donde se busca identificar a

individuos a través de descripciones verbales. La automatización de este proceso es un desafío debido a las diferencias entre la geometría y textura de las imágenes faciales; y los bosquejos generados por especialistas. El estudio enfatiza la importancia del reconocimiento facial por retrato hablado en situaciones de seguridad, así también, explora las peculiaridades de construcción de retratos hablados, describiendo los factores que afectan tanto al declarante como al especialista en la creación de estos retratos. Finalmente, se presentan tres enfoques principales para el reconocimiento facial por retrato hablado:

1. Comparación de imágenes de rostros con bocetos manuales.
2. Comparación de imágenes de rostros con bocetos generados por composición de imágenes.
3. Comparación de imágenes de rostros con bocetos generados de manera inversa (pseudo imágenes vs. pseudo bocetos).

Cada enfoque se examina en detalle, destacando las ventajas y limitaciones de los métodos existentes. Además, se describen sistemas computarizados utilizados para la creación asistida de retratos hablados, como SketchCop FACETTE®, Identi-Kit®, IQ Biometrix FACES®, y EFIT-V Facial Identification. Estos sistemas (Tabla 1 Comparación sistemas tradicionales vs. propuesta de tesis) permiten generar bocetos de manera más rápida y eficiente que los métodos manuales tradicionales [2], [6], [9]

<b>Sistema</b>	<b>Metodología</b>	<b>Entrada principal</b>	<b>Tecnología / Algoritmos</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>
----------------	--------------------	--------------------------	--------------------------------	-----------------	---------------------

<b>SketchCop FACETTE®</b>	Ensamblaje de rasgos faciales desde una base de datos forense	Selección asistida por operador	Base de datos morfológica + reglas de composición	Interfaz amigable, ampliamente usado en agencias de seguridad	Limitado al contenido de su base; no genera variación estilística
<b>Identi-Kit®</b>	Sistema modular basado en plantillas y combinaciones	Selección manual de rasgos	Superposición 2D guiada por categorías antropométricas	Intuitivo, estándar en fuerzas policiales	Alta subjetividad; depende del operador; apariencia rígida
<b>IQ Biometrix FACES®</b>	Combinación paramétrica de rasgos	Menú guiado de rasgos faciales	Ensamblaje digital + reglas de posición antropométrica	Biblioteca amplia; personalizable	Resultados poco realistas; estilo limitado
<b>EFIT-V</b>	Síntesis facial mediante algoritmos evolutivos + modelado 3D	Retroalimentación iterativa del testigo	Algoritmos genéticos + modelos 3D + ajuste de textura	Realismo superior; guía interactiva	Requiere entrenar al testigo; proceso más lento; costoso
<b>Propuesta de tesis: Sistema lineal + Fourier</b>	Reconstrucción mediante superposición lineal de partes filtradas	Selección de rasgos + filtrado espacial + fusión frecuencial	Sistemas lineales, principio de superposición, filtros espaciales (Dodge&Burn, XDoG, Canny, etc), Transformada de Fourier	Apariencia tipo boceto; coherencia anatómica; flexibilidad; procesamiento matemático explicable	No usa aprendizaje profundo; requiere selección adecuada de rasgos; depende del ajuste de parámetros

Tabla 1. Comparación sistemas tradicionales vs. propuesta de tesis

El estudio también se presenta diversas bases de datos utilizadas para evaluar los métodos de reconocimiento por retrato hablado. Algunas de estas incluyen imágenes faciales y bocetos generados a partir de descripciones verbales. En conclusión, la creciente importancia del reconocimiento facial por retrato hablado en la seguridad y la criminalística, y aunque existen desafíos en la automatización de esta técnica debido a las diferencias entre imágenes faciales y bocetos, se están desarrollando métodos y sistemas computarizados para mejorar la precisión y eficiencia en la identificación de individuos a partir de descripciones verbales [2], [9].

Otros estudios han emergido como una herramienta crucial en la autenticación biométrica y la investigación forense, gracias a su naturaleza intuitiva y no intrusiva. Sin embargo, enfrenta desafíos significativos debido a factores como la variabilidad en la pose, la iluminación, las expresiones faciales y el envejecimiento humano [3].

Tales investigaciones proporcionan una revisión completa sobre los avances recientes en el reconocimiento facial, incluyendo técnicas de aprendizaje profundo, extracción de características y reconocimiento en condiciones adversas como iluminación variable o expresiones faciales. Discutiendo desafíos actuales como el sesgo algorítmico y la necesidad de datos más representativos, así como aplicaciones prácticas en seguridad, vigilancia y autenticación biométrica [1], [3]

Un aporte relevante desde la India donde proponen un método geométrico para clasificar formas faciales. Esta metodología, basada en medidas craneofaciales, ofrece una base estructural que puede complementar los sistemas automáticos de reconocimiento facial, especialmente en contextos forenses donde se requiere una clasificación precisa de rasgos morfológicos. Presenta un método geométrico para clasificar las formas faciales, aplicando un enfoque matemático y analítico en la evaluación de las características faciales. Proponen que una clasificación precisa de la forma del rostro es

crucial en diversas áreas, como la odontología, la cirugía reconstructiva y la estética facial. El método descrito emplea medidas geométricas específicas del cráneo y la cara, como la longitud y el ancho, para definir diferentes tipos de formas faciales. Se identifican categorías comunes como ovalada, redonda, cuadrada, y rectangular, entre otras. Este enfoque facilita una evaluación objetiva y reproducible, que puede ser útil en la planificación de tratamientos clínicos y estéticos, además de proporcionar una base para estudios antropométricos. También se destaca la importancia de contar con métodos de clasificación precisos en el contexto clínico, ya que los tratamientos personalizados en odontología y cirugía maxilofacial requieren de un entendimiento detallado de la morfología facial [10].

Diversos estudios clínicos han aplicado mediciones cefalométricas y registros fotográficos para clasificar la forma facial de poblaciones juveniles y adultas, validando la confiabilidad del enfoque geométrico [11].

Se utilizó un método geométrico para clasificar la forma del rostro en función del ángulo de convergencia en la fotografía. Con base en el ángulo de convergencia entre la parte más ancha de la cara y el tercio inferior, medio y superior de la cara, se clasificó la forma de la cara. Este método de clasificación amplía la clasificación existente de la forma facial con tres tipos adicionales de formas faciales. Se realizó una comparación entre las formas faciales obtenidas por métodos clínicos y fotográficos. Las formas faciales obtenidas por método clínico y fotográfico no mostraron diferencias significativas ( $p > .05$ ) entre ellas. Un método geométrico en fotografía puede ser un método eficaz para analizar las diversas formas faciales para superar los errores en el juicio visual en el método clínico comúnmente utilizado con el indicador de forma facial. Se resalta el método geométrico propuesto para la clasificación de las formas faciales y su relevancia en campos clínicos y estéticos [10].

Asimismo, estudios de posgrado profundizan en la identificación craneofacial mediante la cuantificación y comparación morfológica. Contribuyendo al fortalecimiento de los métodos objetivos de identificación humana, integrando análisis biométricos avanzados con aplicaciones forenses. La identificación craneofacial es un proceso crucial en antropología forense, arqueología y otras disciplinas que requieren la reconstrucción o identificación de individuos a partir de restos óseos o faciales. El estudio se enfoca en cómo se pueden medir y comparar morfologías craneales utilizando técnicas geométricas y estadísticas avanzadas. Presenta diferentes métodos para la cuantificación de características craneales, incluyendo la morfometría geométrica y el análisis de formas tridimensionales. Estos métodos permiten una mayor precisión al comparar y clasificar cráneos o estructuras faciales, proporcionando herramientas valiosas para identificar individuos o realizar análisis poblacionales. También se discuten las limitaciones y desafíos de la identificación craneofacial, como la variabilidad intraespecífica y el deterioro de los restos óseos. Destaca la importancia de la evolución de las técnicas morfométricas para mejorar la fiabilidad en la identificación, facilitando la comparación entre individuos y proporcionando un enfoque más objetivo frente a los métodos tradicionales. Enfatizando los métodos y técnicas utilizados para la identificación y comparación craneofacial, subrayando su relevancia en el ámbito forense y antropológico [11]

Por otro lado, estudios de origen español introducen un enfoque automatizado para la clasificación de rasgos faciales con base en su apariencia visual [7]. Esta propuesta resulta particularmente útil en la automatización de procesos forenses, ya que permite establecer categorías morfológicas de manera rápida y objetiva, apoyando tanto la identificación humana como la generación de retratos hablados más precisos. También presenta un enfoque automatizado para la clasificación de rasgos faciales basado en su apariencia utilizando técnicas de visión por computadora e inteligencia artificial. El objetivo es

desarrollar un sistema que pueda identificar y categorizar los rasgos faciales de manera automática y precisa, aplicando modelos de aprendizaje automático. El estudio analiza grandes conjuntos de datos faciales, aplicando algoritmos de reconocimiento de patrones para extraer características clave como la forma de los ojos, la nariz, la boca y otros rasgos distintivos. Luego, estos datos se utilizan para entrenar modelos que clasifican los rostros en función de su apariencia general. El proceso automatizado ofrece ventajas sobre los métodos tradicionales manuales, al ser más rápido y menos susceptible a sesgos humanos [7].

Este procedimiento se utilizó para clasificar los rasgos faciales de 290 imágenes de hombres con expresión neutra de la Base de Datos de Rostros de Chicago, obteniendo taxonomías de ojos, bocas y narices para varios grupos étnicos. Para validar el procedimiento, se midió la concordancia de los evaluadores humanos con las taxonomías propuestas. De los 200 casos para cada característica, el 41,0% de las bocas, el 31,0% de los ojos y el 46,5% de las narices, fueron clasificados por humanos en el mismo grupo que en el procedimiento automático. Más del 73,0% de los rasgos se clasificaron en el conglomerado esperado o en los tres conglomerados más cercanos a él (75,5% de las bocas, 73,0% de los ojos y 81,0% de las narices). Los resultados muestran que el sistema tiene un alto nivel de precisión en la clasificación de los rasgos faciales, lo que lo hace útil para aplicaciones en áreas como la biometría, la investigación forense y la seguridad. Los autores destacan que esta tecnología puede evolucionar para mejorar la identificación facial en diferentes contextos. Enfatiza el uso de tecnología automatizada para clasificar rasgos faciales y la relevancia de este método en aplicaciones prácticas como la biometría y la seguridad [7]

### **1.2.2 Desafíos en el Reconocimiento Facial**

Varios estudios destacan las limitaciones que enfrentan los sistemas de reconocimiento facial cuando se presentan variaciones en la iluminación, las expresiones faciales o los ángulos de visión. También se subraya la necesidad de desarrollar algoritmos más robustos que mantengan su precisión bajo condiciones no ideales, como aquellas típicas de escenarios forenses, donde las imágenes disponibles son de baja resolución o calidad [3].

En investigaciones sobre la detección y análisis facial, se enfocan en temas como reconocimiento de expresiones, análisis de emociones, estimación de dirección de la mirada y aplicaciones en psicología y diagnóstico de trastornos. Destacando métodos basados en aprendizaje profundo y análisis dinámico facial [12].

En otras investigaciones se exploran los avances recientes en sistemas de reconocimiento facial, incluyendo mejoras en algoritmos de aprendizaje profundo, técnicas de preprocesamiento de imágenes y aplicaciones en seguridad y vigilancia [2].

Las variaciones en la iluminación, la orientación facial y las expresiones pueden afectar significativamente el rendimiento de los sistemas de reconocimiento facial. Estos sistemas tienden a funcionar mejor en entornos controlados, pero su precisión disminuye en condiciones no ideales [3].

En escenarios forenses, las imágenes de baja resolución y calidad, a menudo obtenidas de dispositivos como cámaras de seguridad, presentan un desafío adicional para la identificación precisa [13].

### **1.2.3 Avances Tecnológicos**

Se han propuesto enfoques basados en la fusión de múltiples algoritmos comerciales para optimizar el rendimiento de los sistemas de reconocimiento facial, especialmente en entornos digitales forense digital. Paralelamente, diversos estudios han recopilado importantes avances en detección y análisis de imágenes faciales, incluyendo la expresión emocional. Asimismo, se ha explorado el impacto de las redes neuronales profundas para mejorar la extracción de características faciales y la generación de rostros sintéticos mediante modelos de difusión [1], [2], [12].

Se ha propuesto un enfoque de fusión multi-algoritmo que utiliza múltiples sistemas comerciales de reconocimiento facial para mejorar la precisión de identificación, superando las debilidades de los enfoques individuales [2].

Con respecto al uso de redes neuronales profundas ha permitido extraer características complejas y de alto nivel, mejorando la precisión del reconocimiento facial en aplicaciones de vigilancia y cumplimiento de la ley [1].

En el enfoque Generación de Imágenes y Modelos de Difusión: la generación de imágenes faciales de alta calidad a partir de descripciones textuales mediante modelos de difusión ha mostrado potencial para acelerar las investigaciones criminales y mejorar la precisión de los bocetos faciales [1].

#### **1.2.4 Aplicaciones en Criminalística**

El reconocimiento facial ha sido utilizado como herramienta clave en investigaciones forenses, permitiendo la identificación de individuos a partir de descripciones incompletas o imágenes degradadas. También se ha destacado la capacidad de las tecnologías de mejora de imagen basadas en IA para restaurar fotografías deterioradas sin comprometer la identidad facial, aumentando así la utilidad de este recurso en la criminalística [3].

Además, se ha documentado su uso en seguridad pública, resaltando tanto su eficacia como las implicaciones éticas y legales, lo cual demanda un equilibrio entre el resguardo de la ciudadanía y la protección de los derechos individuales. Estas investigaciones exploran el papel del reconocimiento facial en seguridad pública. Debatiendo temas éticos y legales relacionados con derechos humanos y vigilancia tecnológica [6], [14].

El reconocimiento facial forense se ha convertido en un componente esencial en las investigaciones criminales, permitiendo la identificación de sospechosos a partir de imágenes obtenidas en condiciones desafiantes [15].

Investigaciones analizan las tendencias en el desarrollo del reconocimiento facial forense, destacando la importancia de la precisión en contextos legales y las implicaciones éticas asociadas con el uso de estas tecnologías en investigaciones criminales [6].

En el enfoque de mejoras en la Imagen, las técnicas utilizadas e impulsadas por IA (Inteligencia Artificial) pueden restaurar imágenes degradadas, preservando la identidad facial para su uso en reconocimiento forense [3], [13].

### **1.2.5 Desafíos y Direcciones Futuras**

Los aspectos éticos y legales del uso del reconocimiento facial en aplicaciones forenses han sido motivo de creciente preocupación. Algunos estudios abogan por establecer marcos regulatorios sólidos que garanticen la transparencia algorítmica, el respeto por la privacidad y la participación informada de las víctimas en el proceso de generación de retratos hablados [6].

El uso de tecnologías de reconocimiento facial plantea preocupaciones éticas significativas, especialmente en lo que respecta a la privacidad individual y las libertades civiles [6].

Se sugiere mejorar el soporte metodológico y legal para la investigación forense, así como modernizar los métodos de comparación mediante la introducción de tecnologías de la información [2].

Otras investigaciones evalúan la precisión de sistemas de reconocimiento facial en contextos forenses. Utiliza bases de datos sintéticas y escenarios realistas. Concluye que la calidad de las imágenes impacta fuertemente en la efectividad del reconocimiento [3], [13].

En resumen, aunque el reconocimiento facial ha avanzado significativamente, especialmente con la integración de tecnologías de aprendizaje profundo y fusión de algoritmos, sigue enfrentando desafíos en términos de precisión bajo condiciones no ideales y preocupaciones éticas. La investigación futura debe centrarse en abordar estos desafíos mientras se equilibran las preocupaciones tecnológicas y éticas [3], [6].

### **1.2.6 MX Investigaciones y Aplicaciones en México**

En el contexto mexicano, se han desarrollado iniciativas significativas que muestran una evolución clara del retrato hablado tradicional hacia sistemas computarizados más precisos y eficientes. El Instituto Nacional de Ciencias Penales (INACIPE) ha liderado propuestas que integran algoritmos evolutivos y procesamiento digital para generar retratos más realistas, planteando una alternativa al enfoque verbal clásico [8]. A su vez, el proyecto Caramex, documentado por el Instituto Internacional de Estudios en Seguridad Global (INISEG), destaca por su sistema de codificación morfológica y biométrica con apoyo multidisciplinario, mejorando sustancialmente la identificación humana [8].

Desde una perspectiva histórica, se desarrolló un sistema computarizado en colaboración con la UNAM y la PGJ-DF [8], basado en características

antropofísicas de la población mexicana, lo cual permitió obtener retratos hablados cultural y fenotípicamente más representativos. Estas investigaciones evidencian un compromiso sostenido con la mejora de los métodos de identificación forense en el país, promoviendo soluciones tecnológicas adaptadas al contexto social y legal mexicano [8].

Diversas investigaciones han documentado la evolución de la técnica del retrato hablado, desde su enfoque tradicional hasta la incorporación de algoritmos genéticos en la creación de retratos compuestos. Se reconoce que la técnica tradicional tiene limitaciones en la identificación facial lo que ha impulsado el desarrollo de sistemas de cuarta generación que utilizan programación evolutiva y algoritmos genéticos para construir retratos hablados más precisos. Estos sistemas, como Evo-Fit y EFIT-V, emplean rostros completos y la programación con algoritmos genéticos para combinar y evolucionar los rasgos hacia un retrato objetivo. El fundamento psicológico de estos métodos se basa en la percepción holística de los rostros, donde las representaciones mentales se almacenan en un espacio facial multidimensional. Se utiliza el análisis de componentes principales (PCA) para reducir la variabilidad del espacio de información a componentes principales que representan características holísticas. Estos componentes se utilizan para construir retratos nuevos. Se presentan tres sistemas de cuarta generación: ID, INIH y Evo-Fit, los cuales permiten a los testigos seleccionar rostros similares al objetivo y utilizan algoritmos evolutivos para generar retratos compuestos. Se detalla cómo funciona cada sistema y se evalúa su eficacia mediante experimentos [2], [9].

Se destaca el proyecto CARAMEX, que creó un acervo de imágenes de rasgos faciales basados en la población mexicana. Posteriormente, se desarrolla Caramex-II, un software que utiliza algoritmos de reconocimiento facial y redes neuronales para construir retratos hablados. Este software se basa en la detección de rasgos faciales en imágenes del acervo Caramex y utiliza una

red neuronal convolucional para generar retratos compuestos. En resumen, el artículo explora la evolución de los retratos hablados desde enfoques tradicionales hasta el uso de algoritmos genéticos y redes neuronales en la construcción de retratos compuestos más precisos y detalla sistemas específicos y proyectos relacionados con esta técnica [8].

Investigaciones del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) presentan diversos sistemas utilizados para generar retratos hablados y se comparan los algoritmos de metamorfosis disponibles, como metamorfosis con mallas, metamorfosis con campos, funciones de base radial, minimización de energía y deformación de forma libre multinivel. Un nuevo sistema de creación de retratos hablados que utiliza el algoritmo de metamorfosis para reducir la cantidad de imágenes requeridas para formar un rostro. Esto resulta en una colección compacta de imágenes, optimizando la búsqueda de rasgos faciales. La metodología consiste en desarrollar el retrato hablado de manera incremental, centrándose en un rasgo facial a la vez. Se emplea un algoritmo de detección de bordes para especificar las características, lo que mejora la eficiencia de la metamorfosis en formas irregulares y reduce la carga computacional. El sistema desarrollado se evalúa con un nivel de satisfacción promedio de 2.8, en una escala de evaluación de 1 a 5, lo que indica un nivel aceptable de satisfacción por parte de los usuarios. Comparativamente, este nivel de satisfacción se encuentra entre los mejores junto con el sistema FACES. Las principales contribuciones del trabajo incluyen desarrollar un sistema fácil de usar para crear rostros con variaciones controladas, implementar la metamorfosis para generar rasgos faciales a partir de imágenes y obtener retratos hablados en menos tiempo con un nivel de satisfacción positivo en comparación con otros sistemas evaluados [16].

### 1.2.7 Aplicaciones de la Transformada de Fourier en Reconocimiento Facial

Diversos estudios han empleado la transformada de Fourier como herramienta metodológica clave en sistemas de reconocimiento facial (Tabla 2. Tabla comparativa aplicaciones de TF en reconocimiento facial vs. propuesta de tesis). Esta técnica permite representar una imagen en el dominio de la frecuencia, facilitando el análisis de patrones repetitivos, bordes y estructuras espaciales que no son tan evidentes en el dominio espacial. A continuación, se destacan las investigaciones que incorporan esta herramienta. Estos métodos permiten una mejor manipulación y análisis de patrones espaciales en imágenes faciales, lo que resulta útil en contextos donde la calidad de imagen es deficiente o donde se requiere comparar características morfológicas bajo diferentes condiciones [17], [18].

<b>Estudio de la Metodología</b>	<b>Tipo de Entrada</b>	<b>Tecnología / Algoritmos basados en Fourier</b>	<b>Ventajas Reportadas</b>	<b>Limitaciones Observadas</b>
Análisis de componentes principales sobre proyecciones espectrales [19]	Imágenes frontales en escala de grises	Descomposición de imágenes en frecuencias principales (PCA + DCT/DFFT)	Reducción dimensional eficiente; detección rápida	Sensible a iluminación y expresiones; no recrea rasgos
Extracción de características en dominio de frecuencias [18]	Bases de datos de rostros (FERET)	FFT para filtrado de texturas y altas frecuencias	Resalta patrones faciales; mejora discriminación	Requiere imágenes limpias; no construye bocetos

Reconocimiento basado en fase y componentes de Fourier[17]	Imágenes faciales con variación moderada	Phase-only correlation (POC)	Alta precisión con ruido; fase estable	No genera representaciones visuales nuevas
Análisis multiescala de frecuencias orientadas [18], [20]	Rostros etiquetados por atributos	Filtros de Gabor (Fourier local)	Muy robusto a cambios de expresión	Complejo computacionalmente; no usa texto descriptivo
Modelado de contornos y formas[18]	Mapas de bordes, contornos faciales	DFT para describir contornos como series de Fourier	Excelente para geometría facial	No representa textura o rasgos suaves
Extracción espectral + redes profundas [1]	Grandes bases de datos biométricas	FFT para realzar frecuencias útiles antes de CNN	Altísima precisión (>98%)	Requiere millones de datos; no aplicable a retratos hablados
PROPUESTA. Superposición lineal de rasgos + análisis espectral de bordes (FFT) para obtener bocetos consistentes desde descripciones verbales	Etiquetas verbales de rasgos + base de 50 retratos tipo boceto	FFT para análisis de microbordes + superposición lineal para reconstrucción	Genera bocetos anatómicamente coherentes; independiente del operador; reproducible; integra descripción verbal y composición matemática	Base de datos inicial pequeña; prototipo sin validación por expertos; requiere expansión y variabilidad

Tabla 2. Tabla comparativa aplicaciones de TF en reconocimiento facial vs. propuesta de tesis

Estas investigaciones mencionan el uso de análisis en el dominio de la frecuencia para mejorar la extracción de características biométricas suaves.

La transformada de Fourier les permite identificar componentes faciales asociadas a características como edad o género bajo condiciones no controladas [18], [20], mientras que otras, incluye la transformada de Fourier como parte del preprocesamiento en sistemas de reconstrucción facial 3D. En su revisión sobre reconstrucción facial 3D con aplicaciones forenses, incluyen la transformada de Fourier como parte de las etapas de preprocesamiento de imágenes. Su uso permite filtrar ruido y extraer detalles relevantes para la reconstrucción tridimensional del rostro, optimizando la calidad de los modelos generados [3], [13].

Aunque el enfoque principal de su estudio es la clasificación automática de rasgos faciales, emplean la transformada de Fourier para la extracción de descriptores faciales en etapas de análisis de textura y forma, contribuyendo a la precisión de su sistema de categorización morfológica [7].

Estos estudios evidencian que la transformada de Fourier no solo es útil en la mejora visual de imágenes, sino también como herramienta clave para la segmentación, el filtrado de ruido y la extracción eficiente de características biométricas en el reconocimiento facial automatizado.

Esta clasificación temática permite contextualizar el presente proyecto, orientado a desarrollar un sistema lineal basado en transformadas de Fourier y operado por las propias víctimas, dentro del marco internacional de investigación y desarrollo en el campo del reconocimiento facial forense.

### 1.3 Planteamiento del problema

El retrato hablado continúa siendo una herramienta fundamental en la criminalística mexicana, en un contexto donde se reportan decenas de millones de delitos anuales y tasas de incidencia superiores a 30,000 delitos por cada 100,000 habitantes, lo que incrementa la necesidad de mecanismos eficaces de identificación [21], [22]. En una gran proporción de estos casos no se dispone de evidencia visual para la identificación, y la elevada “cifra negra” —superior al 90% de delitos no denunciados o sin carpeta de investigación— limita los mecanismos formales de documentación, reforzando la necesidad de herramientas complementarias como el retrato hablado digital [23].

Asimismo, la percepción de inseguridad permanece alta, ya que cerca del 58.6% de la población urbana considera inseguro vivir en su ciudad, lo que subraya la importancia de fortalecer las herramientas tecnológicas de apoyo a la investigación criminal [24].

En este contexto, depender exclusivamente de bocetos hechos por expertos puede resultar insuficiente, debido a la subjetividad del proceso y los errores de comunicación verbal entre víctima y especialista.

El retrato hablado constituye una herramienta esencial en las ciencias forenses y criminalísticas para la identificación de sospechosos. Sin embargo, los métodos tradicionales de elaboración dependen en gran medida de la interpretación subjetiva de un dibujante experto o técnico especializado, lo que introduce variabilidad en los resultados. A esta limitación se suma la dificultad que enfrentan las víctimas o testigos al describir con precisión los rasgos faciales del agresor, generando retratos poco fieles a la realidad y reduciendo su valor probatorio en investigaciones judiciales.

Aunque existen sistemas computarizados que han buscado automatizar la generación de retratos hablados, la mayoría se centra en bases de datos

limitadas de rasgos predefinidos y en técnicas de combinación estáticas, sin aprovechar plenamente herramientas matemáticas que permitan una síntesis flexible, precisa y escalable de la información visual.

La falta de metodologías robustas que integren fundamentos matemáticos, como los sistemas lineales y la transformada de Fourier, con un enfoque interactivo centrado en la víctima, limita la evolución del retrato hablado hacia un recurso más objetivo y confiable. En este contexto, el problema central que aborda esta investigación se formula de la siguiente manera: ¿Cómo desarrollar un método de reconstrucción de retratos hablados que, mediante el principio de superposición y el uso de la transformada de Fourier, permita obtener representaciones más precisas, escalables y útiles para los procesos de identificación en criminalística, reduciendo la subjetividad inherente al método tradicional? [2], [6].

#### **1.4 Justificación**

Dada la gran cantidad de delitos que ocurren en México y la limitada denuncia formal, es vital disponer de herramientas que permitan a las víctimas aportar pruebas visuales, aunque no haya evidencia fotográfica.

Cuando más de la mitad de la población urbana siente inseguridad (58.6%, según ENSU 2024), hay una clara demanda de mecanismos que mejoren la percepción de justicia, apoyados por métodos más objetivos y participativos [21], [24].

Mejorar la precisión de los retratos hablados puede ayudar a complementar investigaciones policiales en estados como Estado de México, Ciudad de México, Guanajuato, donde las tasas delictivas y de delitos denunciados son muy altas [22].

La seguridad pública en México y en muchas otras regiones enfrenta el desafío constante de mejorar los procesos de identificación de personas en contextos delictivos. El retrato hablado sigue siendo un recurso vigente, particularmente en situaciones donde no se dispone de evidencia audiovisual. Sin embargo, sus limitaciones metodológicas reducen su fiabilidad y su capacidad de contribuir efectivamente a la resolución de casos [2], [6].

El desarrollo de un sistema de reconstrucción sustentado en fundamentos matemáticos ofrece ventajas técnicas claras. El uso de la Transformada de Fourier permite analizar y combinar rasgos faciales en el dominio frecuencial, facilitando la integración de bordes, la reducción de artefactos y una síntesis visual más coherente [13], [17], [25]. Asimismo, el principio de superposición posibilita la escalabilidad del método hacia bases de datos más amplias y diversas, incrementando el número de combinaciones morfológicas posibles.

De igual forma, la incorporación de una interfaz interactiva centrada en la víctima favorece la selección guiada de rasgos, mejorando la fidelidad perceptual del retrato final y reduciendo la dependencia del operador humano, estrategia alineada con la evolución reciente de los sistemas de composición facial asistida [9].

En conjunto, esta propuesta integra teoría matemática y procesamiento digital de imágenes para atender un problema de alto impacto social, contribuyendo tanto al avance científico como al fortalecimiento de las herramientas tecnológicas disponibles para la criminalística.

### **1.5 Hipótesis**

Hipótesis general: La aplicación del principio de superposición y de la transformada de Fourier en la reconstrucción de retratos hablados permite generar representaciones visuales de rasgos faciales más precisas y

coherentes que los métodos tradicionales, mejorando la fidelidad del retrato a partir de descripciones verbales.

Hipótesis específicas:

La representación de rasgos faciales en el dominio frecuencial, mediante la transformada de Fourier, mejora la integración visual de las partes del rostro en comparación con técnicas espaciales tradicionales.

El principio de superposición aplicado a patrones faciales permite una síntesis flexible y escalable, generando un número elevado de combinaciones de retratos hablados.

La interacción directa de la víctima en la selección de rasgos generados automáticamente incrementa la precisión percibida del retrato final en relación con los métodos manuales.

## **1.6 Objetivos**

Investigar y desarrollar un método de reconstrucción de bocetos de retratos hablados mediante la aplicación del principio de superposición y la transformada de Fourier, con el objetivo de mejorar la precisión y fidelidad en la representación visual de rasgos faciales en situaciones de seguridad y criminalística.

Objetivos específicos

1. Realizar un análisis exhaustivo del principio de superposición en sistemas lineales y su aplicación en el contexto de la reconstrucción de retratos hablados.
2. Profundizar en el concepto de la transformada de Fourier y su capacidad para descomponer la información visual de rasgos faciales en diferentes

frecuencias, permitiendo una representación matemática más precisa de los bocetos.

3. Estudiar y seleccionar un conjunto representativo de retratos hablados (crear o buscar base de datos) y su correspondiente descripción verbal (etiquetas), considerando la diversidad de rasgos faciales y características étnicas presentes en la población mexicana.

4. Desarrollar un algoritmo que implemente el principio de superposición y la transformada de Fourier en la reconstrucción de bocetos de retratos hablados. Este algoritmo deberá ser capaz de superponer las características de las descripciones verbales para crear una representación coherente.

5. Validar el método propuesto mediante pruebas y experimentos utilizando bases de datos de retratos hablados y descripciones verbales. Comparar los bocetos reconstruidos utilizando el método con los bocetos originales y evaluar la precisión y fidelidad de la representación.

6. Realizar análisis comparativos con otros enfoques de reconstrucción de retratos hablados, incluyendo métodos manuales y algoritmos genéticos, para evaluar la efectividad y ventajas del método basado en superposición y transformada de Fourier.

7. Refinar y ajustar el algoritmo de reconstrucción en función de los resultados de las pruebas y los comentarios de expertos en el campo de seguridad y criminalística.

8. Documentar los resultados obtenidos, incluyendo la descripción detallada del método propuesto, las pruebas realizadas y las comparaciones con otros enfoques. Estos resultados podrán ser compartidos en publicaciones académicas y conferencias relevantes. El objetivo final es establecer un método eficaz y confiable de reconstrucción de bocetos de retratos hablados que pueda ser utilizado como una herramienta valiosa en investigaciones criminales y aplicaciones de seguridad, mejorando la capacidad de

identificación de individuos a partir de descripciones verbales y contribuyendo al avance de la tecnología en el campo de la criminalística visual.



## **CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO**

Este capítulo presenta los fundamentos teóricos del procesamiento digital de imágenes y los sistemas lineales que sustentan la propuesta metodológica. Se describe cómo la representación digital, junto con los filtros espaciales y frecuenciales, permiten la detección y realce de bordes faciales. Se introduce la Transformada de Fourier como herramienta fundamental para la manipulación de componentes en el dominio de la frecuencia y combinación de patrones faciales. Además, se abordan aspectos geométricos como traslación, escala y puntos cefalométricos necesarios para la alineación precisa de partes del rostro. Finalmente, se define la nueva teoría a desarrollar, basada en la clasificación de rasgos faciales y la reconstrucción del retrato mediante superposición de imágenes en el dominio frecuencial.

### **2.1 Teoría Fundamental**

Esta sección tiene como propósito establecer los fundamentos teóricos esenciales que sustentan el desarrollo del procesamiento digital de imágenes, los sistemas lineales, las herramientas matemáticas y los modelos geométricos utilizados en la reconstrucción facial digital. El propósito es exponer los conceptos universales que conforman la base científica sobre la cual se construye la propuesta metodológica del proyecto.

El procesamiento digital de imágenes constituye una de las áreas más importantes de la ingeniería y las ciencias computacionales, ya que permite la manipulación matemática de imágenes para extraer información, mejorar la calidad visual y facilitar tareas automáticas de reconocimiento. A través de

transformaciones, filtrados y análisis espectrales, es posible obtener representaciones más útiles para la interpretación de fenómenos visuales.

La teoría de sistemas lineales y el principio de superposición proporcionan el marco conceptual que permite modelar matemáticamente el comportamiento de las operaciones aplicadas a las imágenes. En particular, la linealidad y la superposición garantizan que las transformaciones mantengan coherencia entre la entrada y la salida, condición indispensable en el análisis frecuencial.

Por su parte, la Transformada de Fourier y sus derivaciones permiten estudiar las imágenes desde un punto de vista espectral, revelando la estructura de frecuencias que componen los detalles, contornos y formas globales. Esta representación frecuencial constituye una herramienta indispensable para el filtrado, la reconstrucción y la segmentación.

Adicionalmente, los fundamentos geométricos y anatómicos, como los puntos cefalométricos, aportan un marco de referencia para el estudio estructural del rostro humano. La combinación de estos principios matemáticos y anatómicos forma el sustento teórico necesario para comprender las operaciones de reconstrucción facial basadas en transformadas y filtrado digital.

En conjunto, los temas abordados en esta sección proporcionan la base conceptual sobre la que se apoya el desarrollo de modelos más avanzados. Estos fundamentos teóricos serán retomados en la siguiente sección para formular la nueva teoría aplicada al proyecto, integrando los principios aquí revisados dentro de un marco metodológico propio.

### **2.1.1 Fundamentos del Procesamiento Digital de Imágenes**

El procesamiento digital de imágenes constituye la base teórica y práctica de este proyecto, ya que permite analizar, transformar y mejorar imágenes

mediante técnicas computacionales orientadas al reconocimiento y reconstrucción facial. En esencia, el procesamiento de imágenes busca convertir una imagen digital en otra imagen modificada o extraer información útil de ella [13]

#### **2.1.1.1 Definición y objetivos del procesamiento de imágenes**

El procesamiento digital de imágenes (PDI) se define como el conjunto de operaciones matemáticas y computacionales aplicadas sobre una imagen digital con el propósito de mejorar su calidad visual o extraer características relevantes. A diferencia del procesamiento analógico, el PDI trabaja sobre matrices discretas de valores de intensidad, lo que permite realizar manipulaciones como filtrado, segmentación, restauración y análisis de textura. Entre sus objetivos principales se encuentran:

- Mejorar la visualización de una imagen para facilitar su interpretación humana.
- Extraer información estructural y morfológica relevante para tareas de clasificación, segmentación o reconstrucción.
- Automatizar procesos de reconocimiento y diagnóstico, mediante algoritmos que simulan la percepción visual humana.

Según González y Woods [13], el PDI puede clasificarse en tres niveles:

- Bajo nivel, orientado a operaciones básicas como filtrado, realce y restauración.
- Nivel intermedio, enfocado en la segmentación y descripción de regiones.

- Alto nivel, centrado en la interpretación y toma de decisiones, como el reconocimiento de objetos o rostros.

De acuerdo con Pratt [26], el procesamiento de imágenes se organiza en tres niveles de abstracción, dependiendo del propósito del análisis:

- Procesamiento de bajo nivel: Incluye filtrado, suavizado, reducción de ruido y realce de bordes. Son operaciones píxel a píxel o mediante máscaras pequeñas (kernels), que preparan la imagen para etapas posteriores.
- Procesamiento de nivel medio: Se centra en la segmentación, detección de contornos y análisis de regiones, permitiendo aislar estructuras faciales como ojos o nariz.
- Procesamiento de alto nivel: Comprende el reconocimiento y clasificación de objetos, como el reconocimiento facial, donde los rasgos extraídos se comparan con una base de datos.

El presente proyecto, opera principalmente en los dos primeros niveles, dado que la metodología involucra preprocesamiento (nivel bajo) y fusión y reconstrucción facial (nivel medio), aplicando la Transformada de Fourier y el principio de superposición.

#### **2.1.1.2 Representación digital de una imagen.**

Una imagen digital puede considerarse como una función bidimensional  $f(x,y)$ , donde los valores de  $x$  y  $y$  representan coordenadas espaciales, y  $f(x,y)$  la intensidad de luminancia o nivel de gris en ese punto. En el contexto computacional, dicha función se discretiza en una matriz de píxeles, donde

cada elemento contiene un valor de intensidad entre 0 y 255 (para imágenes de 8 bits).

Esta representación permite el procesamiento mediante operaciones matemáticas, tales como transformadas (Fourier, Wavelet), convolución o correlación. La discretización de la imagen es esencial para aplicar algoritmos lineales o no lineales, que operan sobre los valores de los píxeles [13], [26].

### **2.1.2 Sistemas Lineales y Principio de Superposición**

El estudio de los sistemas lineales es fundamental en el análisis y procesamiento de señales e imágenes, ya que proporciona el marco matemático que permite predecir cómo una entrada (señal o imagen) será transformada en una salida mediante operaciones lineales. En el caso de la reconstrucción de retratos hablados, cada parte del rostro (ojos, nariz, boca, etc.) puede considerarse como una función espacial independiente que, al combinarse de manera lineal, da lugar a una representación completa del rostro humano [27].

#### **2.1.2.1 Concepto de sistema lineal**

Un sistema lineal es aquel que satisface las propiedades de homogeneidad y aditividad, conocidas en conjunto como el principio de superposición.

Matemáticamente, si el sistema  $T$  transforma una entrada  $f(x, y)$  en una salida  $g(x, y)$ , entonces obtenemos la siguiente ecuación 1, donde  $a_1$  y  $a_2$  son constantes escalares

$$T\{a_1f_1(x, y) + a_2f_2(x, y)\} = a_1T\{f_1(x, y)\} + a_2T\{f_2(x, y)\} \dots \dots \dots (1)$$

Esto implica que la respuesta de un sistema a una combinación de señales de entrada es igual a la combinación de las respuestas individuales a cada señal.

En el contexto del procesamiento digital de imágenes, un sistema lineal puede representar operaciones de filtrado, convolución o transformación, donde cada punto de la imagen resulta de una combinación ponderada de intensidades vecinas [17], [28].

### 2.1.2.2 Propiedades de linealidad y superposición

Las dos propiedades fundamentales que caracterizan a un sistema lineal son:

- Homogeneidad (Escalamiento): Si una imagen de entrada  $f(x, y)$  se multiplica por una constante  $k$ , la salida del sistema también se multiplica por esa misma constante, ver ecuación 2.

$$T[k * f(x, y)] = k * T[f(x, y)] \dots \dots \dots (2)$$

- Aditividad (Suma): Si el sistema recibe dos entradas  $f_1(x, y)$  y  $f_2(x, y)$ , la respuesta a la suma de ambas entradas será igual a la suma de las respuestas individuales, ver ecuación 3.

$$T[f_1(x, y) + f_2(x, y)] = T[f_1(x, y)] + T[f_2(x, y)] \dots \dots \dots (3)$$

La combinación de ambas propiedades se conoce como el principio de superposición, que establece que un sistema lineal responde a la combinación ponderada de múltiples entradas con una salida proporcional y acumulativa.

En el caso de las imágenes, esto permite superponer partes faciales tratadas como funciones independientes, garantizando que la suma de sus transformadas (en el dominio de la frecuencia) represente correctamente el rostro compuesto [25], [27].

### **2.1.3 Transformada de Fourier en Imágenes Digitales**

La Transformada de Fourier constituye una herramienta fundamental en el procesamiento digital de imágenes, al permitir representar una señal visual — como una imagen bidimensional— en términos de sus componentes de frecuencia.

Esta técnica resulta esencial para analizar las variaciones de intensidad en una imagen, distinguir entre regiones suaves y bordes abruptos, y aplicar filtros que mejoren la calidad visual o extraigan características relevantes. En el contexto de este proyecto, la transformada se emplea para separar, filtrar y recomponer las partes faciales (ojos, nariz, boca, etc.) en el dominio espacial y frecuencial, mejorando la nitidez y la coherencia visual del retrato hablado reconstruido [13], [17].

#### **2.1.3.1 Fundamentos matemáticos de la Transformada de Fourier bidimensional**

La Transformada de Fourier bidimensional (2D-FT) de una imagen  $f(x, y)$  se define como, ver ecuación 4:

$$F(u, v) = \iint_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{-j2\pi(ux + vy)} dx dy \dots \dots \dots (4)$$

Donde  $F(u, v)$  representa el espectro de frecuencias espaciales de la imagen. La transformada inversa permite regresar al dominio espacial, ver ecuación 5:

$$f(x, y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} F(u, v) e^{j2\pi(ux + vy)} du dv \dots \dots \dots (5)$$

En el procesamiento digital, se utiliza la Transformada Discreta de Fourier (DFT) y, para mejorar la eficiencia computacional, su versión rápida conocida como Fast Fourier Transform (FFT) [25], [29]. La DFT discretiza la imagen en puntos finitos ( $M, N$ ) y se expresa (ver ecuación 6) como:

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \dots \dots \dots (6)$$

### 2.1.3.2 Ejemplo: análisis de textura y bordes mediante FFT

En el contexto del presente trabajo, se aplica la FFT a cada parte facial para identificar las regiones de alta frecuencia que corresponden a bordes. Mediante la multiplicación espectral con filtros pasa altas (por ejemplo, gaussiano, Butterworth, o Sobel en frecuencia), se logra:

- Resaltar los bordes internos de los rasgos (párpados, labios, fosas nasales).
- Eliminar los bordes externos no deseados de la plantilla original.
- Preparar las imágenes filtradas para su superposición lineal (según el principio de sistemas lineales).

El resultado final es un conjunto de imágenes faciales transformadas que, al combinarse, generan un retrato hablado con trazos definidos, sin bordes artificiales y con apariencia de dibujo realista [13], [26].

## 2.1.4 Filtros Espaciales

### 2.1.4.1 Concepto y clasificación

Los filtros espaciales operan directamente sobre los valores de intensidad de los píxeles en el dominio espacial, modificando sus valores en función de los niveles de gris de los píxeles vecinos. Matemáticamente, este proceso se representa mediante una convolución espacial entre la imagen original  $f(x, y)$  y un kernel o máscara  $h(x, y)$ , expresada (ver ecuación 7) como:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) \dots \dots \dots (7)$$

Donde  $g(x, y)$  es la imagen resultante y  $[*]$  es el operador de convolución.

Los filtros espaciales se clasifican en dos grandes grupos:

- Filtros lineales, donde la salida es una combinación lineal de los píxeles de entrada (ejemplo: Sobel, Prewitt, Laplaciano, etc.)
- Filtros no lineales, que dependen de relaciones no lineales entre píxeles (ejemplo: mediana, máximo, mínimo) y son útiles para eliminar ruido impulsivo o sal y pimienta.

Estos filtros son esenciales para el realce de bordes, suavizado de regiones, detección de contornos y mejora de detalles locales [13], [28].

### 2.1.4.2 Filtros lineales y no lineales

Los filtros lineales se basan en la teoría de sistemas lineales invariantes en el tiempo (LTI), donde el principio de superposición es aplicable. En el contexto facial, permiten acentuar los límites entre zonas de distinto contraste, como los

bordes de los ojos o labios. Por ejemplo, el filtro Sobel utiliza una máscara que aproxima la derivada espacial de la imagen, resaltando gradientes significativos en direcciones horizontales y verticales [13], [30], [31].

Los filtros no lineales, por otro lado, son adecuados cuando se requiere preservar bordes y eliminar ruido. El filtro de mediana, por ejemplo, reemplaza cada píxel por la mediana de su vecindad, reduciendo el ruido sin difuminar excesivamente los contornos [13], [32].

En el proyecto de reconstrucción de retratos hablados, ambos tipos de filtros resultan útiles: los lineales para resaltar bordes faciales y los no lineales para suavizar transiciones antes de aplicar transformadas en frecuencia.

#### **2.1.4.3 Filtros de realce (Sobel, Prewitt, Laplaciano, Dodge & Burn, Canny, XDoG y Pencil Sketch)**

Los filtros de realce buscan resaltar la información estructural más relevante de una imagen —como bordes, contornos y transiciones de intensidad—, lo cual es fundamental para el reconocimiento y reconstrucción de rasgos faciales. Estos filtros son particularmente útiles en las fases de preprocesamiento de imágenes antes de aplicar la Transformada de Fourier o métodos de composición facial. A continuación, se describen los principales filtros considerados en este proyecto.

##### **Filtros de realce (Sobel)**

Calcula la magnitud del gradiente en las direcciones horizontal y vertical mediante máscaras  $3 \times 3$   $\times$   $3 \times 3$ , siendo útil para detectar bordes suaves

y naturales. En el contexto facial, este filtro realiza los límites de los ojos, labios y contornos de la nariz, manteniendo un equilibrio entre detección y suavizado [13], [26]. Matemáticamente, su núcleo se define (ver matrices 8) como:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

La magnitud del gradiente se obtiene (ver ecuación 9) como:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \dots\dots\dots (9)$$

**Filtros de realce (Prewitt)**

Similar al Sobel, el Prewitt utiliza pesos uniformes para estimar los gradientes, siendo más sensible a variaciones abruptas de intensidad. Es útil cuando se busca una detección más general de bordes, especialmente en regiones con menos textura [13], [28]. El filtro aplica dos máscaras (kernels) 3×3, para bordes horizontales  $G_x$  y para bordes verticales  $G_y$ , (ver matrices 10 y ecuación 11).

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

Luego se calcula la magnitud del gradiente:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \dots\dots\dots (11)$$

**Filtros de realce (Laplaciano)**

El Laplaciano mide la segunda derivada espacial, permitiendo detectar bordes finos y detalles de alta frecuencia. Su forma isotrópica detecta cambios de intensidad en todas direcciones (ver ecuación 12):

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \dots\dots\dots (12)$$

En imágenes faciales, ayuda a definir líneas internas como las arrugas o sombras de expresión, aunque requiere un filtrado previo para reducir el ruido [13], [30].

### **Filtros de realce (Dodge & Burn)**

Inspirado en técnicas de revelado fotográfico, el Dodge & Burn digital aclara (Dodge) y oscurece (Burn) selectivamente zonas de la imagen. Este método ajusta el contraste local, acentuando el volumen y las sombras, lo que contribuye a generar un efecto de “dibujo artístico”. En la reconstrucción de retratos hablados, ayuda a simular el sombreado de los trazos a lápiz [13], [26].

#### **Función técnica**

- Resalta el relieve facial al aumentar la diferencia entre zonas claras y oscuras.
- Acentúa detalles anatómicos como mejillas, labios, pliegues o arrugas.
- Crea sensación de profundidad y realismo, simulando iluminación direccional.
- Permite un efecto artístico, similar a un dibujo sombreado a lápiz o carboncillo.

El procedimiento puede implementarse multiplicando la imagen original por una máscara de intensidad que define qué zonas se aclaran u oscurecen (ver ecuación 13):

$$I_{salida}(x, y) = I_{entrada}(x, y) \times M(x, y) \dots\dots\dots (13)$$

donde  $M(x, y) > 1$  ilumina (dodge) y  $M(x, y) < 1$  oscurece (burn).

El procedimiento, suponiendo que se parte de una imagen en escala de grises  $I$  normalizada en  $[0,255]$ :

1. Invertir la imagen (ver ecuación 14):

$$I_{inv} = 255 - I \dots\dots\dots (14)$$

2. Suavizar (blur) la imagen invertida "máscara" (ver ecuación 15):

$$M = \text{GaussianBlur}(I_{inv}, \sigma) \dots\dots\dots (15)$$

Ejemplo de matriz de convolución para el desenfoque Gaussiano, Kernel  $5 \times 5$  (aprox.  $\sigma \approx 1$ ) (ver matriz 16):

$$\frac{1}{273} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 7 & 26 & 41 & 26 & 7 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

Este Kernel es aplicado por convolución sobre  $I_{inv}$  para obtener  $M$

3. Aplicar Dodge (aclarar detalles finos) (ver ecuación 17):

$$O_{dodge}(x, y) = \min \left( 255, \frac{I(x,y) \cdot 255}{255 - M(x,y) + \epsilon} \right) \dots\dots\dots (17)$$

4. (Opcional) Burn (oscurecer ciertas zonas), con una fórmula análoga cambiando el denominador.

En el contexto del proyecto, en la reconstrucción de retratos hablados, el filtro Dodge & Burn:

- Aporta realismo visual al simular el sombreado manual que haría un dibujante forense.
- Mejora la continuidad de tonos entre partes del rostro (nariz, labios, etc.).
- Complementa la Transformada de Fourier, al ofrecer una apariencia estética más natural tras el filtrado frecuencial.
- Refuerza la percepción tridimensional del retrato final, evitando que parezca plano o excesivamente digital.
- “Dodge & Burn” no usa una sola máscara fija como un filtro de Sobel o Laplaciano. Es un proceso no lineal donde la “máscara” suele ser una versión desenfocada e invertida de la propia imagen.

### **Filtros de realce (Canny)**

La detección de bordes es una operación fundamental en el procesamiento digital de imágenes, empleada para identificar los contornos de los objetos dentro de una imagen, lo cual es crucial en tareas de segmentación, reconocimiento de patrones y visión por computadora. Los bordes se caracterizan por ser zonas donde ocurren cambios abruptos de intensidad, por lo que un método efectivo debe identificar estas transiciones de manera precisa y robusta [13], [31].

Entre los múltiples algoritmos existentes, el detector de bordes propuesto por John F. Canny en 1986 es uno de los más utilizados por su combinación de sensibilidad a bordes reales, precisión de localización y control sobre el número de falsas detecciones [31].

El algoritmo de Canny se compone de cinco etapas secuenciales que buscan cumplir con tres criterios óptimos: detección máxima de bordes, localización precisa y mínima respuesta múltiple a un solo borde [31].

1. Suavizado mediante filtro gaussiano: Antes de calcular los bordes, se reduce el ruido de la imagen aplicando un filtro Gaussiano. Esto evita que pequeñas variaciones o imperfecciones generen bordes espurios. La imagen  $I(x, y)$  se convoluciona con una función Gaussiana, (ver ecuación 18):

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} * e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \dots\dots\dots (18)$$

Donde  $\sigma$  representa la desviación estándar de la distribución gaussiana, determinando el grado de suavizado.

2. Cálculo del gradiente de intensidad: Se aplican operadores como Sobel para estimar las derivadas parciales de la imagen en las direcciones horizontal y vertical. A partir de estos, se obtiene la magnitud y la dirección del gradiente, que representan la fuerza y orientación de los bordes (ver ecuación 19).

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \quad \theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \dots\dots\dots (19)$$

La magnitud  $G$  indica la fuerza del borde, y el ángulo  $\theta$  la orientación del borde. Esta operación revela los puntos donde hay mayor variación de intensidad, es decir, posibles bordes.

3. Supresión no máxima (Non-Maximum Suppression): Para obtener bordes finos, se aplica una supresión de los valores del gradiente que no sean máximos locales en la dirección del gradiente. Este paso elimina píxeles que no forman parte de un borde bien definido, conservando únicamente los que podrían representar un borde real [31].
4. Umbralización por histéresis Se aplican dos umbrales ( $T_{bajo}$ ,  $T_{alto}$ ) para clasificar los píxeles:
  - Si la magnitud es mayor que  $T_{alto}$ , el píxel es parte de un borde fuerte.
  - Si es menor que  $T_{bajo}$ , se descarta.
  - Si está entre ambos, se conserva sólo si está conectado a un borde fuerte.

Esta técnica permite seguir bordes conectados, incluso si algunas partes de ellos son más débiles [31]. El filtro Canny es uno de los algoritmos más utilizados para la detección de bordes.

Este método ofrece alta precisión en la localización de bordes y continuidad de contornos, siendo ideal para el reconocimiento de rasgos finos como labios o contornos de nariz [31].

### **Filtros de realce XDoG (eXtended Difference of Gaussians)**

El XDoG es una extensión del clásico DoG (Difference of Gaussians), diseñado para producir resultados similares a un dibujo artístico. Se basa en la diferencia de dos versiones suavizadas de la imagen con distintos valores de desviación estándar ( $\sigma$ ), amplificando los bordes mediante una función de umbral no lineal. Este filtro genera resultados tipo “boceto a lápiz” al resaltar los contornos dominantes con un fondo blanco y líneas suaves En el contexto

de este proyecto, el XDoG resulta especialmente útil para la creación de retratos hablados estilizados, en términos sencillos, extrae los contornos más relevantes de una imagen y los dibuja con un estilo natural y continuo, ideal para aplicaciones donde se desea representar formas con apariencia manual [33].

#### Fundamento técnico

1. Suavizado dual: Se calculan dos versiones suavizadas de la imagen con diferentes desviaciones estándar ( $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ ), (ver ecuación 20):

$$D(x, y) = G_{\sigma_1}(x, y) - k \cdot G_{\sigma_2}(x, y) \dots \dots \dots (20)$$

donde  $k$  controla la amplitud relativa entre las dos Gaussianas.

2. Umbralización no lineal: A la diferencia resultante se aplica una función tipo sigmoide o exponencial que realza bordes y elimina ruido suave, generando un patrón binario o semitonal.
3. Posprocesamiento: Se ajusta el contraste y se invierte la imagen, logrando líneas oscuras sobre fondo blanco (similar a una ilustración artística).

En el contexto del proyecto, en la reconstrucción de retratos hablados, el XDoG cumple un papel fundamental porque:

- Convierte bordes matemáticos en trazos estéticos, parecidos al trabajo manual de un dibujante forense.
- Refuerza la percepción anatómica del rostro, destacando ojos, labios, nariz.
- Permite una representación estilizada y uniforme, facilitando la fusión de partes faciales procesadas con diferentes filtros.

- Complementa la Transformada de Fourier, ya que puede aplicarse después del filtrado frecuencial para generar la versión final tipo “boceto”.

### **Filtros de realce (Pencil Sketch)**

El filtro Pencil Sketch o “efecto dibujo a lápiz” combina técnicas espaciales, gradientes y operaciones de iluminación simulada (Dodge & Burn) para generar un resultado monocromático y artístico, conservando los contornos principales del rostro y suavizando las texturas superficiales.

Primero se invierte la imagen suavizada mediante un filtro gaussiano, y luego se combina con la original para obtener un efecto de sombreado y trazo simulado.

Su implementación en OpenCV (`cv2.pencilSketch()`) permite obtener retratos monocromáticos con apariencia artística, conservando la estructura facial y reduciendo la textura [13].

Para lograrlo, el algoritmo:

1. Extrae los bordes principales mediante gradientes (resaltando ojos, labios, contornos).
2. Aplica un suavizado Gaussiano que simula el difuminado del grafito.
3. Invierte y combina la imagen suavizada con la original (técnica de Dodge & Burn), generando las luces y sombras que recuerdan al sombreado manual.
4. Ajusta el contraste para resaltar las líneas y eliminar ruido fino, produciendo un trazo limpio y continuo.

## Función técnica

Matemáticamente, el proceso se puede entender así, donde  $I(x, y)$  es la imagen original y  $G_\sigma$  el filtro Gaussiano.

1. Difuminado Gaussiano (ver ecuación 21):

$$B(x, y) = G_\sigma(x, y) * I(x, y) \dots \dots \dots (21)$$

2. Inversión y combinación (Dodge), (ver ecuación 22), esta relación aumenta el brillo en zonas claras y conserva bordes oscuros

$$D(x, y) = \frac{I(x, y)}{255 - B(x, y)} \dots \dots \dots (22)$$

3. Normalización y fusión (ver ecuación 23), donde  $\alpha$  controla el equilibrio entre trazo y sombreado.

$$R(x, y) = \text{clip}(D(x, y) \times \alpha + I(x, y) \times (1 - \alpha)) \dots \dots \dots (23)$$

En el contexto del proyecto e investigación sobre reconstrucción de retratos hablados, el filtro Pencil Sketch cumple funciones importantes:

- Simula el trazo manual de un dibujante forense, dotando al retrato hablado de un aspecto natural y artístico.
- Conserva la estructura anatómica facial, evitando distorsiones, lo que es crucial para la identificación visual.
- Reduce la textura digital (ruido o pixelado), suavizando el resultado final tras aplicar transformadas o filtros de frecuencia.
- Complementa la etapa de posprocesamiento, mejorando la presentación visual del retrato reconstruido antes de su evaluación o validación.

## 2.1.5 Filtros Frecuenciales

### 2.1.5.1 Introducción y fundamento matemático

Los filtros frecuenciales operan sobre la representación espectral de una imagen, la cual se obtiene mediante la Transformada de Fourier bidimensional (FFT). En este dominio, cada punto del espectro representa una frecuencia espacial asociada a la variación de intensidad luminosa en la imagen [13], [17]. El objetivo de aplicar filtros en este espacio es modificar o realzar componentes específicas —como bordes, detalles finos o regiones homogéneas— manipulando la amplitud o fase de las frecuencias.

Matemáticamente, un filtrado en frecuencia se representa (ver ecuación 24) como:

$$G(u, v) = H(u, v) * F(u, v) \dots \dots \dots (24)$$

Donde  $F(u, v)$  es la Transformada de Fourier de la imagen original,  $H(u, v)$  es el filtro en el dominio frecuencial, y  $G(u, v)$  es el resultado filtrado. La imagen procesada se obtiene aplicando la Transformada Inversa de Fourier (IFFT) sobre  $G(u, v)$ .

### 2.1.5.2 Interpretación del espectro de frecuencias

En el espectro de Fourier, los componentes de baja frecuencia (ceranos al centro) representan las variaciones suaves o regiones homogéneas de la imagen, mientras que las altas frecuencias (regiones alejadas del centro) corresponden a bordes, contornos y detalles finos. Por tanto, las bajas frecuencias: definen la estructura global del rostro (forma y tono general). Altas frecuencias: definen los rasgos distintivos (contornos de nariz, labios, ojos, etc.).

En el presente proyecto, esta interpretación permite aplicar filtros pasa altas para realzar los bordes y detalles de cada parte facial, contribuyendo a obtener una apariencia más definida en el retrato reconstruido [13], [17]

En el dominio de Fourier, las bajas frecuencias representan las variaciones lentas (tonos suaves, iluminación general), mientras que las altas frecuencias representan detalles finos y contrastes abruptos (bordes) [13], [26]

Un filtro de alta frecuencia (high-pass) o un filtro de paso de banda (band-pass) es el tipo más natural para detección de bordes en frecuencia [13]

Pero aplicar un filtro “ideal” en frecuencia (por ejemplo, un corte abrupto) suele producir artefactos tipo *ringing* (oscilaciones) alrededor de los bordes, debido al fenómeno de Gibbs. Por eso, muchas veces se prefiere filtros suavizados (Gaussiano, Butterworth, etc.) [17], [25]

Además, los filtros que combinan frecuencia y orientación (tipo Gabor) permiten enfatizar ciertos ángulos de bordes, lo cual puede ayudar a crear un efecto “dibujado” [34]

### **2.1.5.3 Filtros pasa bajas, pasa altas y pasa banda**

Los filtros pasa bajas atenúan las frecuencias altas, conservando la información de baja frecuencia (tonos suaves y regiones homogéneas). Se utiliza para suavizar o eliminar ruido. Ejemplo: filtro Gaussiano pasa bajas [13].

En el filtro pasa altas se resalta los cambios abruptos de intensidad, es decir, los bordes y contornos. En este proyecto se emplean filtros Butterworth y Gaussiano pasa altas para enfatizar los límites de cada parte facial.

Con respecto al filtro pasa banda, este permite un rango de frecuencias intermedio, útil para resaltar texturas específicas o eliminar componentes no deseadas, conservando un balance entre suavizado y realce [13], [28].

En la siguiente tabla 3. Filtros frecuenciales más usados para detección de bordes (y para efecto “line art”), se muestran Filtros frecuenciales más usados para detección de bordes (y para efecto “line art”).

Filtro	Tipo de Filtro	Tipo / Característica	Ventajas para retrato line art	Desventajas
<b>Ideal High-Pass Filter</b>	Pasa altas (ideal)	Corte abrupto: pasa frecuencias por encima de un radio $D_0$ [13]	Muy simple implementar; realza bordes fuertemente	El corte abrupto causa ringing severo / artefactos. No suaviza, resalta ruido
<b>Butterworth High-Pass</b>	Pasa altas (suavizado controlado)	Alta frecuencia con transición suave (orden $n$ ) [13]	Menos artefactos que el ideal, más control sobre la pendiente de transición	Se necesita elegir orden $n$ y radio de corte cuidadosamente. Si el orden es alto, puede aproximarse al filtro ideal
<b>Gaussian High-Pass</b>	Pasa altas (suavizado gaussiano)	Usa función gaussiana para atenuar frecuencias bajas [28]	Muy suavizado, menos artefactos, buena “transición suave”	Puede atenuar demasiado los bordes débiles si el corte es muy bajo
<b>Laplaciano en dominio frecuencial</b>	Derivativo (pasa altas por realce de curvaturas)	Aplica el operador Laplaciano directamente en frecuencia ( $-(u^2 + v^2)$ ) [13], [26]	Hace énfasis en curvaturas y saltos de intensidad en múltiples direcciones	Puede amplificar ruido y producir líneas dobles (efecto cráter)
<b>Marr–Hildreth / LoG (Laplaciano de Gaussiano)</b>	Pasa banda / derivativo	Suaviza con Gaussiana y luego aplica Laplaciano [30]	Buen equilibrio: suaviza ruido y detecta bordes “limpios” mediante cruce por cero	La elección de la sigma de la Gaussiana es crítica
<b>Difference of Gaussians (DoG)</b>	Pasa banda (diferencia suavizada)	Resta de dos Gaussianas con diferentes $\sigma$ [30]	Aproximación más estable del LoG; resalta bordes medios/minutos	No es tan exacto como LoG en la localización del cruce por cero

<b>Gabor / Log-Gabor</b>	Pasa banda orientado (selectivo en frecuencia y dirección)	Filtros con orientación y banda de frecuencias [34]	Muy populares para detección de texturas o bordes orientados	Requiere múltiples orientaciones; sensible a ruido
<b>Filtros “Top-Hat” en frecuencia</b>	Pasa banda (selectivo intermedio)	Seleccionan una banda intermedia de frecuencias [17].	Destacan contornos moderados sin enfatizar ruido extremo	Pueden dejar pasar texturas no deseadas si la banda no está bien elegida
<b>Filtro Sobel en frecuencia</b>	Pasa altas direccional (derivativo en frecuencia)	Implementa la máscara Sobel en el dominio de Fourier para detectar bordes en dirección horizontal y vertical [35], [36].	Resalta contornos definidos y orientados; mantiene la continuidad de líneas sin perder estructura facial	Puede perder bordes suaves o diagonales si no se combinan ambas direcciones; sensible al ruido de alta frecuencia

Tabla 3. Filtros frecuenciales más usados para detección de bordes (y para efecto “line art”)

#### 2.1.5.4 Implementación de filtros frecuenciales

##### Ideal High-Pass Filter

La función del filtro Ideal High-Pass (Pasa Altas Ideal) es eliminar las bajas frecuencias de una imagen y conservar únicamente las altas frecuencias, que representan los bordes, contornos y detalles finos. En otras palabras, este filtro bloquea las variaciones suaves de intensidad (como el tono general o la iluminación) y deja pasar las variaciones abruptas, que son las que definen los límites entre regiones —es decir, los bordes [13], [17].

En el dominio de la frecuencia (Fourier), una imagen está compuesta por:

- Bajas frecuencias: información lenta o suave (iluminación, zonas homogéneas del rostro).
- Altas frecuencias: cambios rápidos de intensidad (bordes de ojos, labios, cabello, nariz).

El Ideal High-Pass Filter (IHPF) aplica una máscara binaria que suprime todas las frecuencias por debajo de un radio de corte  $D_0$  y mantiene intactas las frecuencias mayores (ver ecuación 25):

$$H(u, v) = \begin{cases} 0, & \text{si } D(u, v) \leq D_0 \\ 1, & \text{si } D(u, v) > D_0 \end{cases} \dots\dots\dots (25)$$

Donde  $D(u, v)$  es la distancia entre un punto del espectro y el centro de la Transformada de Fourier.

Luego, la imagen filtrada se obtiene multiplicando el espectro original  $F(u, v)$  por la máscara  $H(u, v)$ , (ver ecuación 26) y transformando el resultado de nuevo al dominio espacial mediante la Transformada Inversa de Fourier (IFFT).

$$G(u, v) = H(u, v) \cdot F(u, v) \dots\dots\dots (26)$$

En procesamiento de imágenes, este filtro resalta los bordes y detalles; ya que enfatiza las transiciones abruptas de intensidad. Así también, aumenta el contraste local entre regiones contiguas; y facilita la detección de contornos, siendo útil en reconocimiento facial y reconstrucción de rasgos [13].

Sin embargo, al ser un filtro de corte abrupto, introduce un efecto no deseado llamado “ringing” o oscilaciones alrededor de los bordes (fenómeno de Gibbs), debido a la discontinuidad del filtro en frecuencia [13], [25].

**Butterworth High-Pass Filter (BHPF)**

Atenúa las bajas frecuencias de manera gradual, controlando la transición entre las zonas bloqueadas (bajas frecuencias) y las que se dejan pasar (altas frecuencias) [13].

Su función de transferencia en el dominio de la frecuencia (ver ecuación 27) se define como:

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + \left(\frac{D_0}{D(u, v)}\right)^{2n}} \dots\dots\dots (27)$$

donde:

- $D(u, v)$  Distancia desde el punto  $(u, v)$  al centro del espectro.
- $D_0$  Radio de corte (frecuencia límite que separa bajas y altas).
- $n$  Orden del filtro (controla la pendiente de transición).
- $H(u, v)$  Máscara frecuencial del filtro.

Cuando  $n$  aumenta, el filtro se aproxima al filtro ideal (corte más abrupto). Valores pequeños de  $n$  generan una transición más suave, reduciendo artefactos [13].

Una vez multiplicado el espectro de la imagen por el filtro  $H(u, v)$  (ver ecuación 28).

$$G(u, v) = H(u, v) \cdot F(u, v) \dots\dots\dots (28)$$

Se aplica la Transformada Inversa de Fourier (IFFT) para regresar al dominio espacial (ver ecuación 29) produciendo una imagen  $g(x, y)$  con bordes realzados y zonas suaves atenuadas [8].

$$g(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{G(u, v)\} \dots\dots\dots (29)$$

En el contexto de la reconstrucción de retratos hablados, este filtro permite resaltar los contornos dominantes del rostro (ojos, nariz, boca, mentón) con un nivel de suavizado controlado, evitando la amplificación del ruido. De esta manera, el Butterworth High-Pass representa una etapa intermedia óptima antes de aplicar filtros artísticos como XDoG o Pencil Sketch [14].

En la tabla 4. Parámetros sugeridos  $D_0$  y  $n$  según aplicación, podemos observar los parámetros recomendados según aplicación.

Parámetro	Rango sugerido	Efecto
$D_0$ (radio de corte)	20–60	Controla qué tanto detalle se conserva. Valores bajos → más suavizado; altos → más bordes [17], [25]
$n$ (orden del filtro)	1–4	Aumenta la nitidez. $n = 1$ genera transiciones suaves; $n > 3$ se acerca al filtro ideal [28]

Tabla 4. Parámetros sugeridos  $D_0$  y  $n$  según aplicación

### Filtro pasa altas Gaussiano

Tiene la función de eliminar las bajas frecuencias de una imagen (información global, iluminación, zonas planas) y preservar las altas frecuencias, correspondientes a los bordes y detalles. A diferencia del filtro ideal, el GHPF emplea una función de decaimiento exponencial suave, lo que evita artefactos o ringing y mantiene una transición continua entre las zonas bloqueadas y las pasantes [13].

La expresión matemática del filtro gaussiano pasa altas en el dominio frecuencial (ver ecuación 30) es:

$$H(u, v) = 1 - e^{-\frac{D^2(u,v)}{2D_0^2}} \dots\dots\dots (30)$$

donde:

- $D(u, v)$  Distancia del punto  $(u, v)$  al centro del espectro de Fourier
- $D_0$  Radio de corte (frecuencia de transición)
- $H(u, v)$  Máscara del filtro pasa altas

*e* Base de los logaritmos naturales (exponencial)

Esta ecuación actúa como el complemento del filtro Gaussiano pasa bajas [13]: (ver ecuación 31 y 32)

$$H_{HP}(u, v) = 1 - H_{LP}(u, v) \dots \dots \dots (31)$$

con

$$H_{LP}(u, v) = e^{-\frac{D^2(u,v)}{2D_0^2}} \dots \dots \dots (32)$$

Entre sus propiedades principales son la Transición suave, ya que no existe discontinuidades en el espectro, es decir, no genera ringing. Así también contiene simetría circular, el filtrado depende solo de la distancia al centro, no de la orientación. Contiene un control continuo, es decir, el parámetro  $D_0$  regula la proporción entre detalle y suavizado.

### Laplaciano en dominio frecuencial

El filtro Laplaciano es un operador derivativo de segundo orden que se utiliza para resaltar bordes, curvaturas y transiciones abruptas de intensidad en una imagen [13], [26]. En el dominio de la frecuencia, este filtro se aplica directamente multiplicando el espectro de la imagen por la versión frecuencial del operador Laplaciano, lo que acentúa las componentes de alta frecuencia y realza los contornos en todas las direcciones

En el dominio espacial, el operador Laplaciano (ver ecuación 33) está definido por:

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \dots \dots \dots (33)$$

Al aplicar la Transformada de Fourier, las derivadas parciales se transforman en multiplicaciones por los términos  $(j2\pi u)$  y  $(j2\pi v)$ , resultando en la siguiente equivalencia (ver ecuación 34):

$$\mathcal{F}\{\nabla^2 f(x, y)\} = -4\pi^2(u^2 + v^2) F(u, v) \dots\dots\dots (34)$$

Por lo tanto, la función de transferencia del filtro Laplaciano en el dominio frecuencial se expresa (ver ecuación 35) como:

$$H(u, v) = -4\pi^2(u^2 + v^2) \dots\dots\dots (35)$$

De forma simplificada (cuando se normalizan las frecuencias), (ver ecuación 36):

$$H(u, v) = -(u^2 + v^2) \dots\dots\dots (36)$$

El signo negativo se asocia con la naturaleza derivativa del operador y se puede omitir en la práctica si solo interesa la magnitud del realce [25].

Entre sus propiedades principales son que es un filtro derivativo (pasa altas); incrementa la amplitud de las altas frecuencias (bordes y cambios bruscos); es Isotrópico, es decir, actúa igual en todas las direcciones; resalta curvaturas, contornos y relieves de la imagen; una de sus desventajas es que amplifica el ruido y puede generar líneas dobles (efecto cráter) [13].

**Filtro Laplaciano de Gaussiano (LoG), también conocido como Marr–Hildreth**

Tiene como función detectar bordes suavizados en una imagen al combinar suavizado gaussiano (para reducir el ruido) con realce Laplaciano (para resaltar las transiciones de intensidad).

A diferencia del Laplaciano puro, el LoG reduce el ruido antes de calcular la segunda derivada, lo que da como resultado bordes más limpios, continuos y estables [30].

El filtro LoG se basa en aplicar la operación Laplaciana sobre una imagen previamente suavizada con una función Gaussiana (ver ecuación n 37):

$$\nabla^2[G_\sigma(x, y) * f(x, y)] = (\nabla^2 G_\sigma(x, y)) * f(x, y) \dots\dots\dots (37)$$

Esto significa que el operador Laplaciano puede aplicarse directamente sobre la Gaussiana y luego convolucionarse con la imagen, para ahorrar cómputo.

Función del núcleo Laplaciano de Gaussiano: La función bidimensional del LoG se define (ver ecuación 38) como:

$$LoG(x, y) = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left[1 - \frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right] e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \dots\dots\dots (38)$$

donde:

- $\sigma$  Desviación estándar de la Gaussiana (controla el grado de suavizado)
- $x, y$  Coordenadas espaciales
- $LoG(x, y)$  Máscara del filtro Laplaciano de Gaussiano

Valores bajos de  $\sigma$  resaltan bordes finos. Valores altos de  $\sigma$  generan bordes más gruesos y suprimen detalles pequeños.

En el dominio de la frecuencia, la Transformada de Fourier del LoG se obtiene directamente de la derivada del filtro Gaussiano (ver ecuación 39):

$$H(u, v) = -4\pi^2(u^2 + v^2) e^{-2\pi^2\sigma^2(u^2+v^2)} \dots\dots\dots (39)$$

Esta expresión combina el efecto de suavizado Gaussiano con el realce Laplaciano, funcionando como un filtro pasa banda: elimina tanto las bajas como las muy altas frecuencias, manteniendo las intermedias donde se ubican los contornos más relevantes [13], [28].

### Filtro Difference of Gaussians (DoG)

Tiene la función de detectar bordes y realzar detalles medios o finos mediante la resta de dos imágenes suavizadas con diferentes valores de desviación estándar ( $\sigma$ ). Es una aproximación eficiente del filtro Laplaciano de Gaussiano (LoG), ya que logra un efecto similar con menor costo computacional [13], [30]

El filtro DoG parte del principio de que el Laplaciano de una Gaussiana puede aproximarse como la diferencia entre dos Gaussianas de distinto ancho ( $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ ) (ver ecuación 40):

$$\nabla^2 G_\sigma(x, y) \approx \frac{G(x, y, \sigma_1) - G(x, y, \sigma_2)}{\sigma_2 - \sigma_1} \dots \dots \dots (40)$$

Por tanto, el filtro DoG se define directamente (ver ecuación 41) como:

$$DoG(x, y) = G(x, y, \sigma_1) - G(x, y, \sigma_2) \dots \dots \dots (41)$$

donde:

- $G(x, y, \sigma)$  Filtro gaussiano bidimensional con desviación estándar  $\sigma$
- $\sigma_1, \sigma_2$  Desviaciones estándar distintas (usualmente  $\sigma_2 > \sigma_1$ )
- $DoG(x, y)$  Resultado de la resta, que actúa como filtro pasa banda

Forma de la función Gaussiana 2D (ver ecuación 42)

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \dots\dots\dots (42)$$

Al restar dos Gaussianas con diferentes  $\sigma$ , se eliminan las frecuencias muy bajas (suavizadas) y se conservan las medias-altas, que corresponden a los bordes y contornos de la imagen.

Algunas propiedades principales es que es un filtro pasa banda derivativo resalta bordes medios y finos; tiene menor costo computacional que LoG; sin embargo, su desventaja es que su localización de bordes es menos precisa que el LoG [3], [30].

**Filtro de Gabor / Log-Gabor**

Es un filtro pasa banda orientado que combina una función sinusoidal (para detectar frecuencias espaciales específicas) con una envolvente gaussiana (para limitar la respuesta en el espacio). Su función principal es detectar bordes, texturas y orientaciones específicas en una imagen, lo que lo convierte en una herramienta clave en visión por computadora, reconocimiento facial y análisis de estructuras periódicas [34].

El Log-Gabor es una variante mejorada que utiliza una escala logarítmica de frecuencias, logrando una mejor representación de bordes naturales y evitando la atenuación de bajas frecuencias que presenta el Gabor clásico.

La función de Gabor en el dominio espacial es la siguiente (ver ecuación 43)

$$G(x, y) = \exp\left(-\frac{x'^2+y'^2}{2\sigma^2}\right)\cos\left(2\pi\frac{x'}{\lambda} + \phi\right)\dots\dots\dots (43)$$

donde:

$x' = x \cos \theta + y \sin \theta$	Coordenada rotada según la orientación $\theta$
$y' = -x \sin \theta + y \cos \theta$	Coordenada perpendicular
$\sigma$	Desviación estándar de la envolvente Gaussiana
$\lambda$	Longitud de onda (frecuencia central)
$\theta$	Orientación del filtro
$\phi$	Fase de la onda sinusoidal
$\gamma$	Relación de aspecto (controla la elipticidad)

Este filtro responde fuertemente a los bordes y texturas que tienen la misma orientación y frecuencia espacial que la del patrón sinusoidal.

La versión Log-Gabor (en el dominio de la frecuencia) utiliza una función gaussiana en el espacio logarítmico de las frecuencias (ver ecuación 44):

$$H(f) = \exp \left( -\frac{[\log (f / f_0)]^2}{2[\log (\sigma_f / f_0)]^2} \right) \dots \dots \dots (44)$$

donde:

- $f_0$  frecuencia central,
- $\sigma_f$  ancho de banda del filtro

El Log-Gabor mantiene una respuesta cero en DC (frecuencia cero), lo que mejora la detección de bordes naturales y elimina el sesgo hacia bajas frecuencias [3].

Algunas propiedades del filtro Gabor / Log-Gabor son que es un filtro pasa banda orientado (frecuencia + dirección); además es sensible a frecuencias específicas y direcciones de borde; y con respecto a su orientación, es controlada por  $\theta$ , típicamente 4–8 orientaciones; también contiene una excelente detección de texturas y patrones direccionales; sin embargo, las

desventajas es que tiene un alto costo computacional y es sensible al ruido [3], [20].

### Filtro Top-Hat en el dominio frecuencial

Es un filtro pasa banda selectiva, diseñado para resaltar las frecuencias intermedias de una imagen, es decir, aquellas que contienen contornos y bordes moderados, evitando tanto las bajas frecuencias (iluminación global) como las altas (ruido o textura fina).

Su nombre proviene de la forma de su respuesta en frecuencia, que se asemeja a un “sombrero de copa” (top-hat), con una región plana central (frecuencias pasantes) y cortes abruptos en los límites inferior y superior [13], [26].

El filtro Top-Hat se define a partir de la diferencia entre dos filtros pasa bajas con distintos radios de corte  $D_1$  y  $D_2$ , donde  $D_2 > D_1$  (ver ecuación 45)

$$H(u, v) = H_{LP}(u, v, D_2) - H_{LP}(u, v, D_1) \dots \dots \dots (45)$$

Donde  $H_{LP}$  puede ser una función de paso bajo ideal, Butterworth o Gaussiana.

Esto genera una banda de frecuencias que deja pasar únicamente los componentes entre  $D_1$  y  $D_2$ , actuando como un filtro pasa banda selectiva.

Si se usa una función gaussiana para el suavizado, el filtro Top-Hat se expresa como (ver f ecuación 46):

$$H(u, v) = e^{-\frac{D^2(u,v)}{2D_2^2}} - e^{-\frac{D^2(u,v)}{2D_1^2}} \dots \dots \dots (46)$$

Donde:

$D(u, v)$	Distancia al centro del espectro de Fourier
$D_1$	Radio de corte inferior
$D_2$	Radio de corte superior
$H(u, v)$	Máscara pasa banda del filtro Top-Hat

Este tipo de función permite un control suave sobre las bandas de frecuencia y evita los artefactos de corte abrupto. Algunas propiedades principales son que es un tipo de filtro pasa banda (selectivo intermedio); su región pasante de frecuencias se encuentra entre  $D_1$  y  $D_2$ ; Además, entre sus principales ventajas es que resalta contornos moderados, bordes limpios y suaves; sin embargo, su desventaja es que si  $D_1$  y  $D_2$  no se eligen adecuadamente, puede pasar textura o ruido [13].

### **Filtro Sobel (en frecuencia)**

Es un operador de detección de bordes basado en gradiente, que estima los cambios de intensidad en las direcciones horizontal y vertical. En el dominio espacial, se implementa mediante convolución con máscaras discretas. En el dominio de la frecuencia, su comportamiento equivale a un filtro pasa altas direccional, ya que las máscaras Sobel actúan como aproximaciones a derivadas de primer orden [26], [28].

En otras palabras, aplicar el Sobel en frecuencia implica multiplicar el espectro de la imagen por la Transformada de Fourier del operador Sobel, lo que realza las componentes asociadas a los bordes horizontales o verticales [28].

El operador Sobel clásico utiliza dos máscaras direccionales (ver matrices 47):

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, S_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (47)$$

Estas máscaras aproximan la derivada discreta en las direcciones  $x$  y  $y$ , respectivamente.

En el dominio de la frecuencia, sus transformadas discretas (DFT) son (ver ecuaciones 48 y 49):

$$H_x(u, v) = -j2\sin(2\pi u/N)[1 + 2\cos(2\pi v/M)] \dots\dots\dots (48)$$

$$H_y(u, v) = -j2\sin(2\pi v/M)[1 + 2\cos(2\pi u/N)] \dots\dots\dots (49)$$

Donde  $N, M$  son las dimensiones de la imagen. Estas funciones actúan como filtros direccionales pasa altas, con respuesta máxima en los bordes y mínima en regiones planas.

El resultado final de Sobel se obtiene combinando ambas direcciones (magnitud del gradiente), ver ecuación 50:

$$G(u, v) = \sqrt{|H_x(u, v)F(u, v)|^2 + |H_y(u, v)F(u, v)|^2} \dots\dots\dots (50)$$

Donde  $F(u, v)$  es el espectro de la imagen original. Esto da una estimación del gradiente de intensidad que representa la fuerza del borde en cada punto.

#### **2.1.5.5 Uso de ventana de Hann para eliminar bordes artificiales**

La ventana de Hann suaviza los bordes de las regiones recortadas antes de aplicar la FFT, reduciendo así las altas frecuencias no deseadas provocadas por cortes abruptos. Esto evita la aparición de bordes residuales (“recuadros”) en las imágenes reconstruidas. El uso de esta ventana contribuye a una

integración más natural cuando las partes faciales se combinan posteriormente en el retrato completo [29].

Las ventanas de Hann y Hamming son funciones que suavizan los bordes de las imágenes antes de aplicar la FFT, evitando artefactos de discontinuidad. Estas ventanas multiplican la imagen en el plano espacial por una función de atenuación gradual, reduciendo los efectos de “borde duro” que se traducen en falsas frecuencias dentro del espectro [25].

### **2.1.6 Fundamento teórico, propiedades de traslación, escalado y convolución**

La traslación y Escalado a partir de puntos de control comunes entre dos imágenes se refiere en el contexto del ensamblaje facial digital, la correcta alineación espacial de las distintas partes del rostro (ojos, nariz, boca, cejas, mentón, orejas y cabello) es crucial para obtener una reconstrucción coherente y anatómicamente fiel. Cuando se dispone de puntos de control comunes (también llamados puntos de correspondencia o puntos cefalométricos) entre dos imágenes, es posible aplicar transformaciones geométricas simples como la traslación y el escalado para alinear estas estructuras sin necesidad de utilizar transformaciones proyectivas más complejas [3], [37].

El registro de imágenes es el proceso de alinear dos o más imágenes de la misma escena tomadas en diferentes momentos, desde diferentes puntos de vista o por diferentes sensores. Uno de los métodos más sencillos y efectivos para lograr esto es mediante el uso de puntos de control (también conocidos como puntos de referencia o puntos de anclaje) que son identificables en todas las imágenes involucradas [37].

Cuando se dispone de múltiples pares de puntos correspondientes, es posible calcular las transformaciones necesarias (como traslación y escalado) para alinear las imágenes. Este enfoque es particularmente útil cuando las imágenes presentan diferencias en escala y posición, pero no en rotación o deformación.

La traslación es una transformación lineal que permite desplazar una imagen en el plano  $x, y$  sin modificar su forma o tamaño. Dada una imagen fuente  $I_s$  con un punto de control  $P_s = (x_s, y_s)$  y una imagen destino  $I_d$  con un punto correspondiente  $P_d = (x_d, y_d)$  la traslación necesaria para alinear ambos puntos se define (ver ecuación 51) como:

$$T_x = x_d - x_s, \quad T_y = y_d - y_s, \dots \dots \dots (51)$$

Aplicando estos valores a todos los píxeles de la imagen fuente, se obtiene una imagen trasladada en la que el punto  $P_s$  ahora coincide con  $P_d$  [37].

Por otro lado, el escalado permite ajustar el tamaño de la imagen fuente para que las distancias relativas entre puntos coincidan con las de la imagen destino. Si se consideran dos o más pares de puntos de control, es posible estimar un factor de escala que minimice la diferencia entre las distancias correspondientes. Suponiendo una distancia euclidiana entre dos puntos en la imagen fuente  $d_s$  y su correspondiente en la imagen destino  $d_d$  el factor de escalado  $S$  se calcula (ver ecuación 52) como:

$$S = \frac{d_d}{d_s} \dots \dots \dots (52)$$

Este escalado puede ser aplicado uniformemente (isotrópico) si se desea conservar las proporciones originales, o de manera diferenciada en  $X$  e  $Y$  si se requiere un ajuste anisotrópico [3].

La aplicación combinada de traslación y escalado a partir de puntos cefalométricos comunes permite una alineación más controlada y anatómicamente coherente, especialmente en contextos donde no se requiere deformación proyectiva [37]. Además, este enfoque evita la necesidad de calcular una matriz 3×3 de transformación, lo cual simplifica la implementación y reduce el error numérico [3].

Esta técnica es particularmente útil en sistemas de reconstrucción facial automática o semiautomática donde cada componente facial (por ejemplo, una boca obtenida de una base de datos) debe ser ubicada con precisión en una plantilla facial base utilizando referencias anatómicas comunes [37].

Las principales propiedades de la Transformada de Fourier que se aprovechan en el procesamiento facial son:

- **Traslación espacial:** un desplazamiento de la imagen en el plano espacial se traduce en un cambio de fase en el dominio de la frecuencia (ver ecuación 53). Esta propiedad es relevante al alinear partes del rostro sobre la plantilla cefalométrica.

$$f(x - x_0, y - y_0, ) \leftrightarrow F(u, v)e^{-j2\pi(ux_0+uy_0)} \dots\dots\dots (53)$$

- **Escalamiento:** aumentar o disminuir el tamaño de una imagen afecta inversamente su distribución espectral. Esta propiedad se utiliza para ajustar proporcionalmente las partes faciales según los tipos de rostro definidos.
- **Convolución:** La convolución en el dominio espacial equivale a una multiplicación en el dominio de la frecuencia (ver ecuación 54)

$$f(x, y) * h(x, y) \leftrightarrow F(u, v) * H(u, v) \dots\dots\dots (54)$$

Esta equivalencia permite aplicar filtros frecuenciales (pasa bajas, pasa altas, o de realce) mediante operaciones más rápidas y controladas en

frecuencia [25], [27] propiedad se utiliza para ajustar proporcionalmente las partes faciales según los tipos de rostro definidos. Se expresa (ver ecuación 55) como:

$$g(x, y) = \sum_m \sum_n f(x - m, y - n) * h(m, n) \dots \dots \dots (55)$$

En el contexto de este proyecto, la convolución puede entenderse como una herramienta para integrar o superponer partes faciales en puntos específicos definidos por coordenadas cefalométricas.

### 2.1.7 Comparativo en Clasificación Facial

Diversos estudios han propuesto métodos para clasificar formas faciales, basados en geometría, apariencia y análisis morfométrico.

Entre ellos se destacan, estudios comparativos entre técnicas geométricas tradicionales y algoritmos automáticos (como PCA y LDA) que se realizaron para clasificar tipos de rostro [38]. Así también, concluyen que, aunque los métodos basados en aprendizaje automático son más flexibles, los enfoques geométricos siguen siendo efectivos [10].

Así también, otras investigaciones presentan un enfoque en el que se utilizan distancias y proporciones entre puntos anatómicos para definir patrones faciales característicos. Este modelo fue tomado como referencia para la extracción precisa de partes del rostro mediante puntos cefalométricos, útil para segmentar automáticamente los rasgos faciales desde imágenes completas [10]. Estos estudios destacan la relevancia de usar puntos de control anatómicos (landmarks) tanto para clasificar como para segmentar con precisión, lo cual sustenta el método utilizado en esta investigación.

Estudios recientes en aplicaciones en el ámbito forense [7], destacan que la clasificación automática de rasgos faciales permite mejorar la precisión en la identificación de individuos, reduciendo la dependencia de la interpretación subjetiva de un perito. Asimismo, [39] George, enfatiza el uso de puntos cefalométricos como referencia anatómica para garantizar la proporcionalidad en reconstrucciones faciales, lo cual se adopta en este proyecto como base para su uso en reconstrucción facial digital permite posicionar con precisión las partes del rostro en relación con una morfología base [39].

#### **2.1.7.1 Sistema de referencia cefalométrico**

El sistema de referencia cefalométrico establece coordenadas  $(x, y)$  para los principales puntos del rostro: glabella, nasion, subnasal, pogonion, gonion, entre otros. Estos puntos sirven para definir tipos de rostros (ovalado, redondo, cuadrado, triangular, rectangular), facilitando la alineación espacial de cada parte facial con su tipo correspondiente. Los parámetros cefalométricos han sido ampliamente utilizados en ortodoncia, cirugía maxilofacial y criminalística forense [39].

En el ámbito del arte forense, detallan una metodología sistemática para el análisis gráfico del rostro humano, enfocándose en la identificación y aplicación de puntos cefalométricos y proporciones geométricas para facilitar la creación precisa de retratos hablados y reconstrucciones faciales. Además, se reconocen las variaciones en proporciones faciales debidas a factores como sexo, edad y etnia, proporcionando rangos de variación para adaptar las plantillas a diferentes perfiles demográficos. El enfoque es particularmente valioso en contextos donde no se dispone de una referencia visual directa,

como en la creación de retratos hablados basados en descripciones verbales o en la reconstrucción facial a partir de restos óseos. Al utilizar puntos cefalométricos y proporciones geométricas, los artistas forenses pueden generar representaciones faciales más precisas y coherentes. El arte forense puede definirse como "arte de retrato sin un sujeto tangible". El objetivo principal es presentar una serie de índices prácticos que interrelacionan las características clave del rostro humano y que proporcionarán una base para cualquier ejercicio de arte forense, desde el boceto compuesto hasta el "re-facing" post-mortem.

Estos índices se ilustran en la fig. 1 con un estudio de las numerosas y a menudo sorprendentes formas geométricas que impregnan el diseño facial. Se examinan los diversos triángulos y rectángulos, romboides y trapecios, paralelogramos y círculo del ojo, la nariz, la boca y el oído. Se revela la geometría subyacente del plano facial humano, ilustrando una selección de triángulos, rectángulos y otros polígonos [39].

Dado que la metodología propuesta para el proyecto implica el uso de transformadas de Fourier para procesar y combinar funciones representativas de partes del rostro, la estructura proporcionada anteriormente [39] puede servir como base para alinear y superponer estas funciones sobre una plantilla facial estandarizada [39].

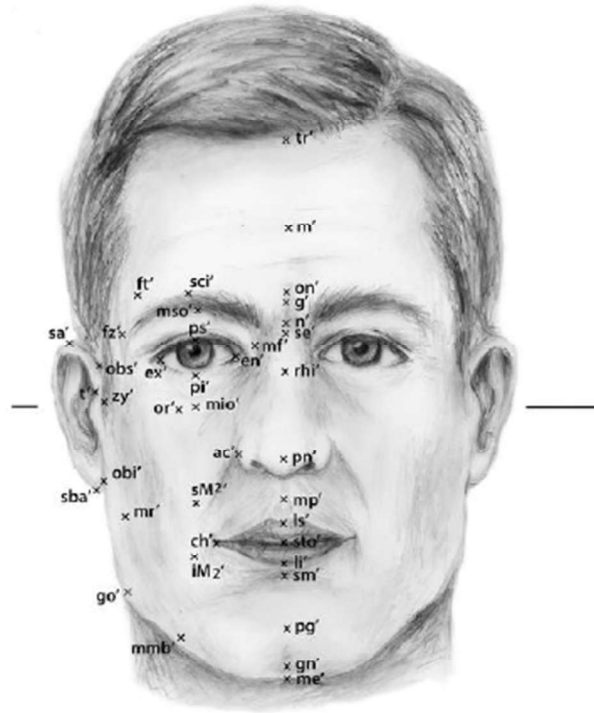


Fig. 1 Puntos cefalométricos [34]

## 2.1.8 Fusión de Partes Faciales

### 2.1.8.1 Suma de imágenes filtradas en frecuencia (principio de superposición)

Siguiendo el principio de superposición de sistemas lineales, las imágenes faciales procesadas individualmente en el dominio frecuencial se combinan mediante la suma espectral [25]. Cada parte facial ( $F_i(u, v)$ ) representa un componente independiente del rostro total (ver ecuación 56):

$$F_T(u, v) = \sum_{i=1}^n F_i(u, v) \dots \dots \dots (56)$$

Donde  $n$  corresponde al número de partes (ojos, nariz, boca, cejas, etc.).

La suma compleja de los espectros permite conservar tanto la magnitud como la fase de cada componente, manteniendo la coherencia espacial del retrato.

### **2.1.9 Aplicación de la Transformada de Fourier a cada parte facial**

Cada imagen facial recortada (parte del rostro) se transforma al dominio de la frecuencia mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Este proceso permite representar la información espacial de la imagen en términos de sus componentes de frecuencia, facilitando la aplicación de filtros de realce o supresión de bordes [13].

La Transformada de Fourier constituye una herramienta fundamental en el procesamiento digital de imágenes, al permitir representar una señal visual — como una imagen bidimensional— en términos de sus componentes de frecuencia.

### **2.1.10 Retorno al dominio espacial**

La Transformada Inversa de Fourier (IFFT) se aplica sobre la imagen compuesta (ver ecuación 57):

$$f(x, y) = Re \{IFFT2(F_T(u, v))\} \dots \dots \dots (57)$$

De esta manera, la información filtrada en frecuencia se reconstruye en una imagen espacial donde los bordes y trazos del rostro se encuentran realzados y los artefactos de borde minimizados [26].



## 2.2 Nueva Sistema a desarrollar

El presente proyecto plantea una nueva metodología para la reconstrucción de retratos hablados denominada Retrato hablado mediante sistemas lineales, la cual se basa en la descomposición del rostro en regiones anatómicas independientes que pueden ser tratadas como componentes lineales. A diferencia del dibujo forense tradicional o de los métodos basados en aprendizaje profundo, esta propuesta se sustenta en principios de procesamiento digital de imágenes, utilizando filtrado espacial como técnica principal para la detección y representación de contornos.

La metodología se organiza en tres fases. En la primera, cada componente facial (ojos, nariz, boca, contorno, etc.) es preprocesado y procesado espacialmente para extraer los bordes esenciales que definen su identidad morfológica. En la segunda fase, la representación espacial se transforma al dominio de la frecuencia donde finalmente, las partes faciales se superponen linealmente de acuerdo con su geometría natural, ajustando posición y escala mediante puntos cefalométricos que aseguran la continuidad anatómica del retrato.

El resultado adopta una estética tipo boceto artístico mediante la técnica de Dodge & Burn, la cual resalta volúmenes y sombras. La implementación específica de este filtro se desarrolla en el Capítulo 3. Esta propuesta constituye una contribución teórico–metodológica orientada al ámbito criminalístico, ya que permite construir retratos hablados de manera reproducible, objetiva y sin dependencia del talento artístico humano o de grandes bases de datos.

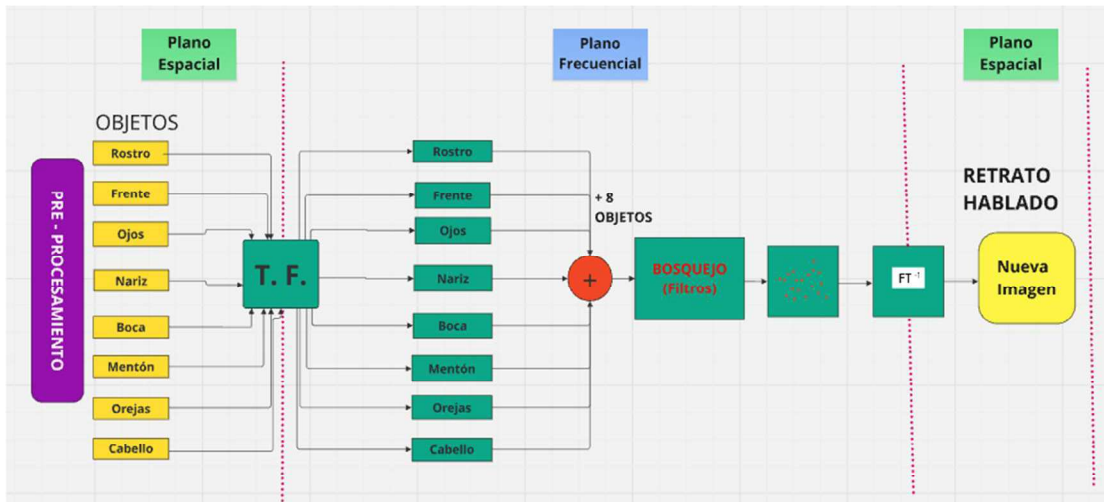


Fig. 2 Diagrama de metodología de Retrato hablado mediante sistemas lineales

### 2.2.1 Clasificación de tipos de rostros y partes de rasgos faciales

Para la síntesis facial propuesta, el rostro se divide en regiones anatómicamente significativas: contorno facial, cejas, ojos, nariz, boca, mentón, orejas y pelo. Esta segmentación facilita el análisis independiente de cada zona y permite tratar cada rasgo como una señal que conserva su estructura morfológica propia dentro de un sistema lineal.

El proceso incorpora puntos cefalométricos como referencia geométrica, los cuales definen proporciones humanas promedio y permiten alinear cada componente facial durante la reconstrucción. De esta manera, se garantiza continuidad entre las partes y se evita la deformación del rostro sintetizado.

En el desarrollo de un sistema de reconstrucción facial mediante técnicas de procesamiento de imágenes, es fundamental contar con una base de datos robusta que contenga una amplia diversidad de tipos de rostro, así como sus

componentes faciales individuales: ojos, nariz, boca, cejas, mentón, entre otros. Esta separación permite un análisis estructurado, facilita la manipulación localizada de características y optimiza la combinación de partes en una imagen compuesta, como en la generación de retratos hablados.

Para este propósito, se utilizó como fuente la base de datos pública disponible en Kaggle: "Human Faces" [40], que contiene más de 30,000 imágenes faciales clasificadas por edad, género y expresiones, en condiciones de iluminación y ángulos relativamente homogéneos. Esta base fue seleccionada por su diversidad de registros y por estar orientada a tareas de aprendizaje automático y visión por computadora, lo que permite una mayor compatibilidad con técnicas modernas de segmentación y clasificación.

Obtención del dataset: Se utilizó el dataset de Kaggle "Human Faces" (Ghosh, 2022), por su diversidad en tipos faciales y su facilidad de procesamiento.

- **Detección de landmarks:** Para detectar regiones correspondientes a ojos, nariz, labios, etc.
- **Segmentación y extracción de partes:** Se extrajeron regiones individuales de cada rostro mediante bounding boxes definidos por los landmarks.
- **Clasificación:** Se realizó un agrupamiento de cada rasgo por tipo morfológico (por ejemplo: labios delgados vs. gruesos) validación cruzada visual.
- **Construcción de base organizada:** Cada tipo facial y cada tipo de rasgo fue guardado en carpetas independientes, facilitando su uso posterior en operaciones como escalado, transformación, fusión e integración morfológica.

En esta sección, se realizó una investigación para establecer una clasificación de los tipos de rostros [10], y partes y rasgos faciales que corresponden a la taxonomía mexicana [41].

Se recolectaron imágenes de ambos géneros de cada parte del rostro [40] de acuerdo con la clasificación establecida en la fig.3. Esta base de datos es necesaria para agregarla al algoritmo que realizará las operaciones necesarias superponiendo y generando un rostro “Retrato hablado”.



Fig. 3 Clasificación de tipos de partes del rostro

## 2.2.2 Aplicaciones en la detección de bordes y rasgos faciales

La detección de rasgos anatómicos en este proyecto se realiza exclusivamente en el dominio espacial, mediante filtros orientados a realzar contornos y sombreado facial como Sobel, Prewitt, Laplaciano, Dodge & Burn, Canny, XDoG y Pencil Sketch. Estos métodos permiten extraer la forma y estructura de cada rasgo facial de manera independiente, capturando su geometría esencial sin depender de la textura original o variaciones de iluminación.

Una vez filtradas y estilizadas las partes faciales, la integración del retrato hablado se realiza mediante un modelo lineal en el dominio frecuencial. En esta etapa no se emplea el dominio de la frecuencia para filtrado, sino únicamente para superponer las componentes faciales a través de la suma espectral. Esta operación garantiza una combinación más suave entre regiones, manteniendo continuidad anatómica y evitando artefactos visibles durante el ensamblaje.

El enfoque propuesto conserva así la función del dominio espacial como eje principal de extracción y estilización de bordes, mientras que el dominio de la frecuencia aporta una reconstrucción más coherente desde el punto de vista estructural y visual. La literatura reciente indica que el dominio espacial es óptimo para la extracción de características visuales interpretables para el reconocimiento humano, mientras que la integración espectral asegura continuidad entre estructuras en sistemas basados en superposición de señales [3], [13], [25], [31], [33].

### 2.2.3 Aplicación en la reconstrucción de imágenes

En el presente proyecto, los puntos cefalométricos constituyen la base geométrica de la plantilla craneofacial digital, sobre la cual se ubican las partes del rostro procesadas.

Cada plantilla representa un tipo de morfología facial y sirve de guía para la traslación y escalado de los rasgos. El uso de estas plantillas permite mantener proporciones anatómicas coherentes, mejorando la fidelidad del retrato hablado reconstruido y facilitando la automatización del proceso mediante coordenadas predefinidas [39].

El principio de superposición tiene una aplicación directa en el campo del procesamiento digital de imágenes. En particular, en este proyecto, se aprovecha para reconstruir retratos hablados a partir de la combinación de múltiples componentes faciales obtenidos de una base de datos.

#### 2.2.3.1 Combinación de funciones (partes faciales)

Cada región facial procesada se representa como una función independiente. La imagen final del rostro (ver ecuación 58) se obtiene mediante:

$$I(x, y) = \sum_{k=1}^n f_k(x, y) \dots \dots \dots (58)$$

Donde cada  $f_k(x, y)$  corresponde a un componente del rostro.

Esto permite un ensamblaje modular y controlado del retrato. De este modo, se logra una composición facial coherente y matemáticamente lineal, en la que las contribuciones de cada rasgo facial son aditivas y controladas en el espectro de frecuencias [25].

### 2.2.3.2 Aplicación de la convolución en el ensamblaje facial

Para ubicar correctamente las funciones en el plano de la imagen, se aplican transformaciones lineales de:

- Traslación
- Escalado
- Alineación geométrica mediante (ver ecuación 59) puntos cefalométricos

$$g(x, y) = f(x - a, y - b) \dots \dots \dots (59)$$

De esta forma, cada componente se ajusta a la estructura final del retrato. Lo que garantiza que cada parte se ubique correctamente sobre la plantilla base, permitiendo una composición anatómicamente coherente y computacionalmente eficiente [37].

### 2.2.3.3 Ventajas de usar traslación y escala con puntos cefalométricos

El uso de referencia anatómica garantiza:

- Control Anatómico Preciso: Este enfoque permite que cada región del rostro se adapte de forma independiente y anatómicamente coherente, como recomiendan los protocolos cefalométricos utilizados en cirugía maxilofacial y odontología forense [11].
- Mayor Adaptabilidad Individual: Al no imponer una transformación global sobre toda la imagen, se logra una integración más flexible y

localizada, especialmente útil cuando los elementos provienen de distintas fuentes [37]

- Evita Deformaciones Perspectivas: El método evita las distorsiones de perspectiva que pueden aparecer con transformaciones proyectivas, manteniendo las proporciones realistas [37].
- Basado en Biomarcadores Estables: utilizar puntos cefalométricos — comúnmente aceptados en odontología forense, cirugía maxilofacial y antropometría— garantiza una base científica robusta para la alineación facial [11], [39].
- Escalabilidad Computacional: Las operaciones de traslación y escalado son computacionalmente ligeras, lo cual permite su integración eficiente incluso en entornos de tiempo real [3].
- Además, se elimina la subjetividad artística inherente al dibujo manual y se mejora la reproducibilidad del proceso.

#### **2.2.4 Comparativa con métodos actuales**

La Tabla 5. Comparativa de métodos actuales para retrato hablado muestra una comparación entre métodos tradicionales de retrato hablado, enfoques digitales modernos y la metodología propuesta. Se destacan criterios como reproducibilidad, nivel de detalle anatómico, dependencia del perito y aplicabilidad forense.

<b>Método</b>	<b>Enfoque técnico</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Aplicación forense</b>
<b>Dibujo artesanal por perito [6]</b>	Ilustración manual basada en testimonio	Alta expresividad artística; ajuste fino al relato	Subjetivo; depende del talento del perito; tiempo elevado	Muy utilizado
<b>Morfing con bases de datos (E-FIT, FACES, Identi-Kit) [9]</b>	Combinación de plantillas	Rápido; interfaz accesible	Limitado a rasgos disponibles; apariencia rígida	Uso policial extendido
<b>IA (GANs, Diffusion Models [1])</b>	Redes neuronales para síntesis facial	Alto realismo y detalle	Requiere grandes bases de datos; riesgo de sesgos	Uso experimental; poca adopción
<b>Método propuesto: retrato hablado mediante sistemas lineales</b>	Superposición lineal + filtrado	Reproducible; control anatómico; estética tipo boceto	Requiere selección correcta de rasgos y alineación	Alta viabilidad práctica

Tabla 5. Comparativa de métodos actuales para retrato hablado

**Dibujo artesanal por perito.** Este estudio revisa el estado del arte del dibujo forense [6], señalando su alto grado de subjetividad, falta de estandarización y reproducibilidad limitada. Apoya los valores bajos en reproducibilidad, alto en dependencia del perito para el “dibujo artesanal”.

**Morfing / bases de datos.** Estudios muestran mejoras, pero aún limitaciones en rasgos disponibles y precisión. Los sistemas de retrato hablado basados en composición digital de rasgos (como E-FIT, FACES, Identi-Kit) han demostrado ser útiles y ampliamente adoptados por instituciones policiales; sin embargo, presentan limitaciones técnicas importantes como:

La precisión anatómica limitada por la base de componentes disponible; lo cual el usuario está restringido a seleccionar únicamente los elementos presentes en la base de datos del sistema, afectando la exactitud del rostro final.

Realismo visual reducido y apariencia rígida, es decir, los rostros generados pueden resultar artificiales y carentes de naturalidad, especialmente cuando el testigo no encuentra rasgos coincidentes [9].

Dependencia del recuerdo fragmentado del testigo, es decir, los testigos recuerdan los rostros como configuraciones holísticas, pero los sistemas exigen seleccionar rasgos aislados, lo cual compromete la precisión.

**IA (GANs / Diffusion).** Estudios recientes muestran mejoras, pero también problemas de sesgo, falsificación o datos grandes requeridos. Estudios que investigan la precisión y utilidad de la identificación facial, incluyendo procesos compuestos y sistemas modernos [1].

**Método propuesto.** El método intenta mejorar reproducibilidad y control, usando las limitaciones identificadas en las fuentes anteriores. Reproducible, control anatómico, estética tipo boceto. Requiere selección correcta de rasgos y alineación alta viabilidad práctica.

Asimismo, la Fig. 4 presenta una comparación visual mediante diagrama radar que evidencia el equilibrio entre realismo anatómico, reproducibilidad, estética

funcional, dependencia del perito y riesgo de sesgo. Los datos fueron recolectados a través de una encuesta aplicada a 50 personas de diferentes edades y géneros, donde inicialmente se les dio un contexto sobre el software propuesto y de cómo funcionan los otros métodos comparativos actuales para retratos hablados. En la encuesta se les solicitó colocar un valor entre 1-5 (donde la escala de evaluación 1 = Muy bajo / Deficiente, 2 = Bajo, 3 = Medio / Aceptable, 4 = Alto, 5 = Muy alto / Excelente) a cada una de las imágenes mostradas (Apéndice I).

La siguiente Fig. 4 muestra en la parte izquierda el promedio de los parámetros medidos mediante una encuesta aplicada a 50 personas de diferentes edades y géneros. Realismo anatómico, nos proporciona información “Qué tan natural y parecido se ve el rostro de una persona real”. Estética funcional, “Qué tan claros y definidos se ven los rasgos (ojos, nariz, boca), y si el retrato facilita reconocer a la persona. Reproducibilidad, “Qué tan consistente es el método; si al repetirlo produce resultados similares y no muy diferentes. Dependencia del perito, “Qué tanto el resultado depende de la habilidad o experiencia de quien lo dibuja. Y finalmente Riesgo de sesgo, “¿Qué tan probable es que el método favorezca o perjudique a ciertos grupos de personas (por ejemplo, edad, género, tono de piel o rasgos faciales) o que produzca resultados poco justos o representativos?, 1 = Muy bajo sesgo (justo y neutral), 5 = Muy alto sesgo (puede generar resultados injustos o poco representativos). Los resultados en la grafica son promedios obtenidos de la encuesta realizada.

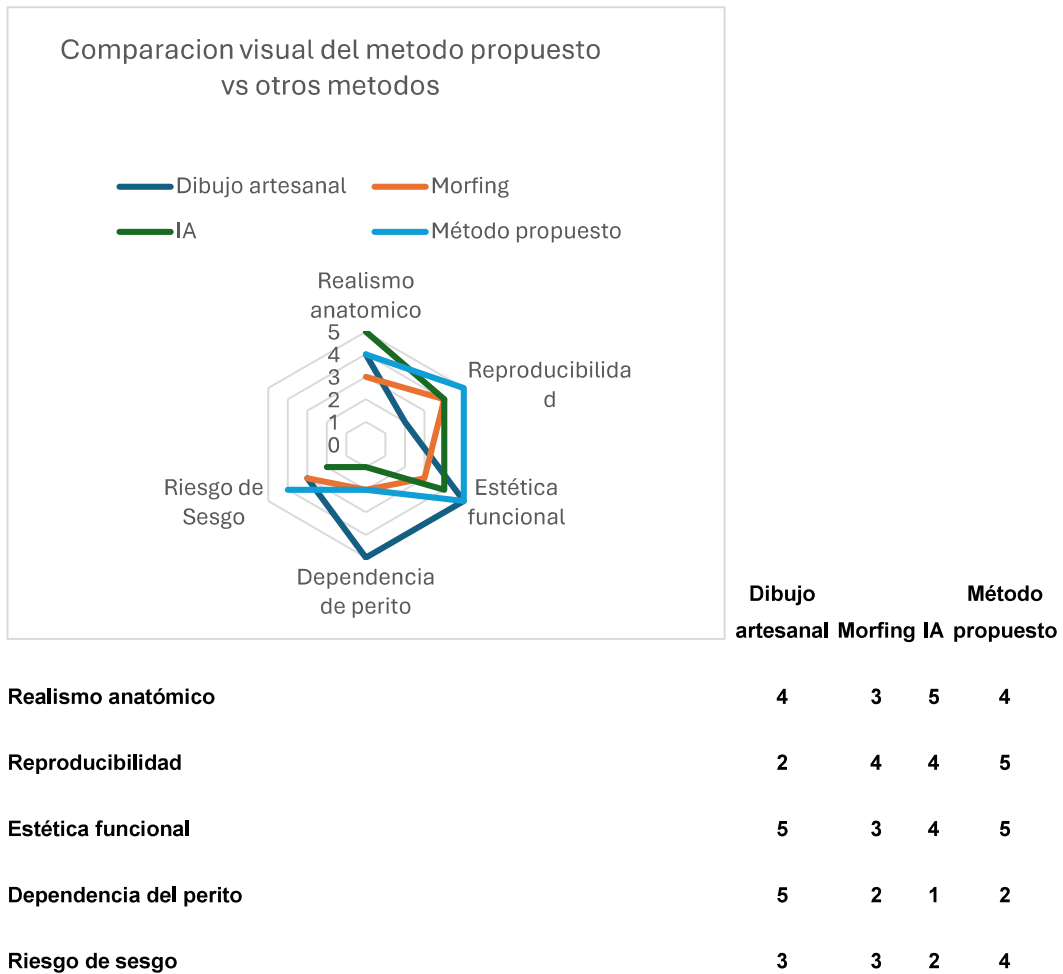


Fig. 4 Comparación visual del método propuesto vs. otros métodos

Concluyendo, la metodología propuesta integra operaciones lineales y filtrado espacial para generar retratos hablados con apariencia de boceto artístico y coherencia anatómica. Su naturaleza modular lo convierte en un sistema objetivo, reproducible y adecuado para apoyar procesos de identificación en investigación criminalística, aportando una nueva teoría práctica en el campo de reconstrucción facial forense.

Los sistemas de retrato hablado basados en morfología por selección de plantillas permiten una mayor rapidez y reproducibilidad que el dibujo artesanal; sin embargo, su precisión está restringida por la cantidad y calidad de los rasgos disponibles en la base de datos, lo que puede producir composiciones rígidas y poco naturales cuando el testigo no encuentra coincidencias exactas [9].



## **CAPÍTULO 3 DESARROLLO TEÓRICO/ EXPERIMENTAL**

Este capítulo describe el proceso de generación del retrato hablado mediante la aplicación de sistemas lineales. En primer lugar, se realiza el procesamiento espacial para extraer contornos y rasgos faciales clave. Posteriormente, se aplica un refinamiento en el dominio frecuencial para mejorar la nitidez y la definición de los detalles. La reconstrucción del rostro se lleva a cabo ensamblaje de partes faciales alineadas con puntos cefalométricos garantizando la coherencia geométrica. Finalmente, se emplea la técnica de Dodge & Burn para lograr una estética tipo boceto forense. Este enfoque permite validar la viabilidad del método en la síntesis facial con fines criminalísticos.

### **3.1 Equipo**

El desarrollo experimental se llevó a cabo en una estación de trabajo con sistema operativo Windows 11 y entorno de programación Python 3.11, seleccionado por su versatilidad y amplia compatibilidad con librerías científicas, de visión artificial y de interfaz gráfica. El equipo utilizado contó con las siguientes especificaciones técnicas:

- Procesador: Intel Core i7 de 11<sup>a</sup> generación, 2.8 GHz
- Memoria RAM: 16 GB
- Tarjeta gráfica: NVIDIA GeForce GTX 1650 con soporte CUDA
- Sistema operativo: Windows 11 Pro (64 bits)

- Entorno de desarrollo: Visual Studio Code con intérprete de Python 3.11
- Dependencias: Control de paquetes mediante pip y entorno virtual configurado con venv

El hardware fue complementado con una cámara digital estándar (720p) para la captura de rostros y pruebas experimentales, además de almacenamiento SSD para la manipulación eficiente de imágenes y matrices de gran tamaño.

### **3.2 Materiales: lenguaje de programación, librerías**

El proyecto se implementó en el lenguaje de programación Python, debido a su potencia para el procesamiento de imágenes, manipulación de datos y desarrollo de interfaces gráficas interactivas.

Las librerías utilizadas se seleccionaron en función de su propósito dentro del flujo metodológico:

- Interfaz gráfica y control de eventos:

kivy.app, kivy.uix, boxlayout, kivy.properties: utilizadas para construir la interfaz de usuario (GUI), compuesta por botones, cuadros de visualización y eventos que invocan las funciones de procesamiento.

Esta interfaz permitió ejecutar secuencialmente los módulos de preprocesamiento, filtrado y transformada de Fourier, facilitando la interacción con el usuario sin requerir comandos en consola.

- Manipulación y almacenamiento de datos:

pandas fue empleada para gestionar estructuras tabulares con los puntos cefalométricos y sus coordenadas, así como para registrar parámetros de pruebas y resultados intermedios.

- Procesamiento de imágenes y operaciones matemáticas:

cv2 (OpenCV) se utilizó para la lectura, conversión, segmentación y filtrado espacial de las imágenes faciales.

numpy sirvió como base para la manipulación de matrices y la aplicación de operaciones vectorizadas.

Scipy, ndimage fue empleada para el filtrado espacial avanzado, mediante convolución con máscaras personalizadas y operaciones de suavizado o realce.

PIL (Python Imaging Library) se usó para convertir formatos de imagen y optimizar el manejo de archivos durante el preprocesamiento.

- Cálculo y fundamentos matemáticos:

Se implementaron conceptos teóricos como la Transformada Discreta de Fourier (TDF) para analizar la información en el dominio frecuencial.

Se aplicó el principio de superposición en la reconstrucción de las imágenes filtradas, combinando componentes de alta y baja frecuencia.

Las operaciones trigonométricas, de distancia y escalado se desarrollaron mediante las funciones del módulo math de Python, facilitando el cálculo de relaciones geométricas entre puntos cefalométricos.

Estas herramientas en conjunto permitieron construir un entorno de trabajo modular, reproducible y de bajo costo, que integró de manera eficiente el procesamiento de imágenes, la experimentación matemática y la interacción con el usuario.

### **3.3 Métodos**

#### **3.3.1 Descripción del diagrama del proceso de reconstrucción**

Durante el desarrollo experimental del proyecto se realizaron ajustes al método inicialmente propuesto, derivados de los resultados obtenidos en las etapas preliminares. En el plan original, el flujo de trabajo contemplaba aplicar las operaciones en el dominio frecuencial sobre las regiones de interés del rostro. Sin embargo, esta secuencia presentó dificultades en la conservación de la información estructural de las imágenes, así como en la interpretación visual de los bordes resultantes.

Por tal motivo, se decidió invertir el orden metodológico, lo cual se visualiza en el siguiente diagrama Fig.5. Retrato hablado mediante sistemas lineales filtrado espacial, aplicado directamente sobre las imágenes y posteriormente realizar las transformaciones al dominio frecuencial. Este ajuste permitió mejorar la legibilidad de los contornos, reducir el ruido previo a la Transformada de Fourier y conservar con mayor precisión los detalles de las estructuras faciales.

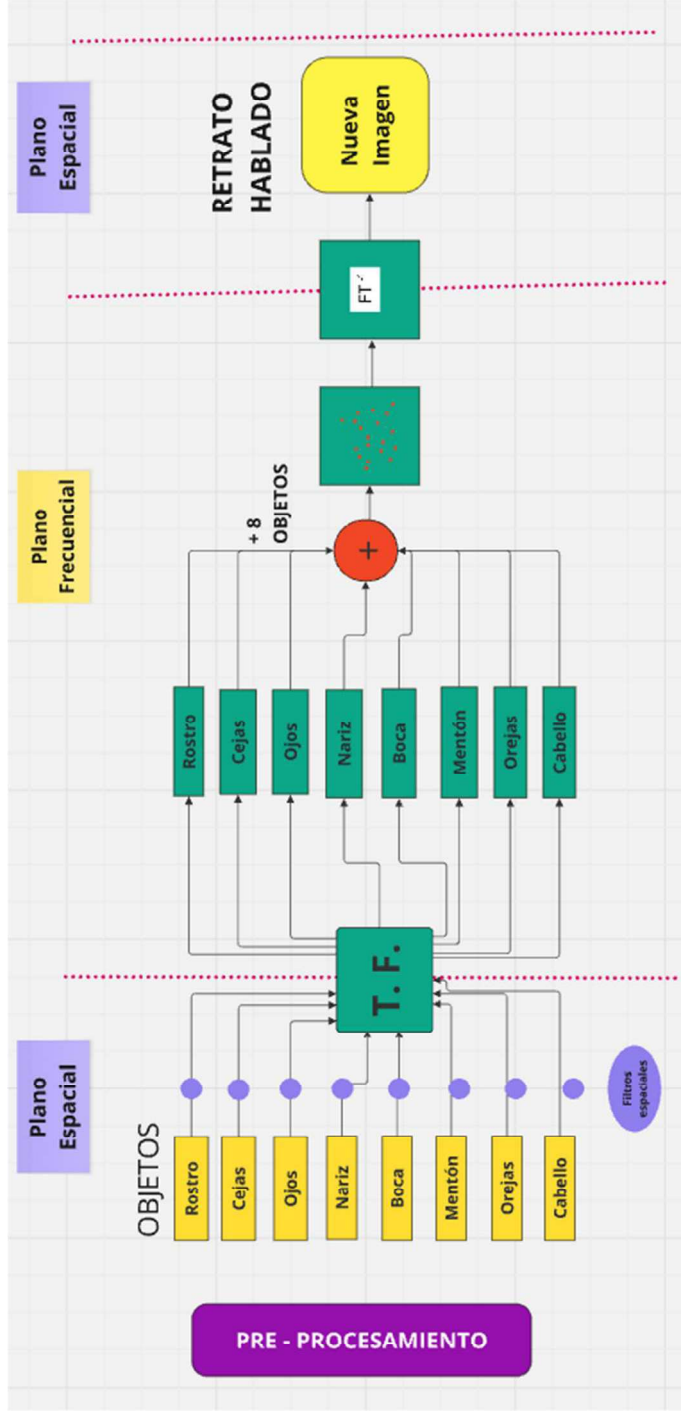


Fig. 5 Diagrama Retrato hablado mediante sistemas lineales

En el presente diagrama se realiza un preprocesamiento inicial sobre las diferentes regiones faciales para normalizar su geometría y contraste. Posteriormente, en el dominio espacial se aplica el filtro de estilización Dodge & Burn a cada componente. Los resultados se transforman al dominio frecuencial mediante la Transformada de Fourier (TF), donde las partes faciales procesadas se combinan mediante superposición lineal y finalmente la Transformada Inversa de Fourier ( $TF^{-1}$ ) regresa al dominio espacial, generando la imagen resultante del retrato hablado estilizado.

### 3.3.2 Diagramas de Flujo Retrato hablado mediante sistemas lineales

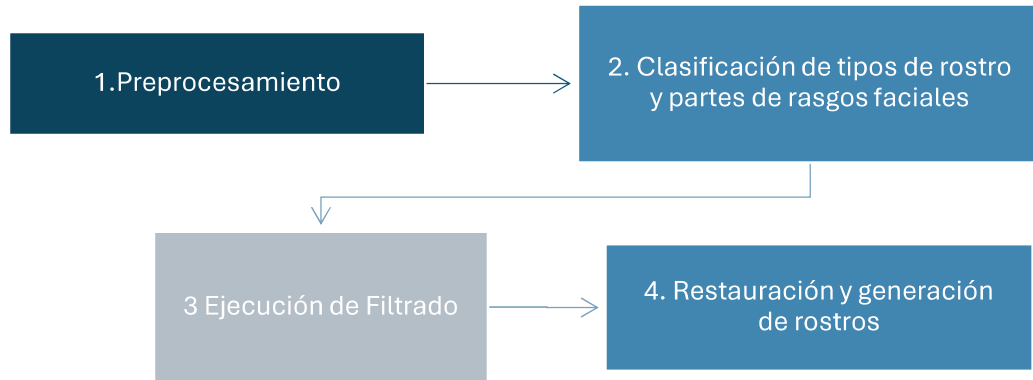


Fig. 6 Diagrama de Flujo Retrato hablado mediante sistemas lineales

El diagrama general del proceso propuesto representa la secuencia completa utilizada para la generación del retrato hablado mediante sistemas lineales. Se inicia con el preprocesamiento de las regiones faciales, donde cada parte del rostro es normalizada en posición, escala e iluminación. Posteriormente, se aplica filtrado espacial y estilización tipo boceto para resaltar las características anatómicas principales. Finalmente, las partes son alineadas y combinadas mediante superposición lineal siguiendo puntos cefalométricos de referencia, y se realiza la Transformada Inversa de Fourier para obtener la reconstrucción final del rostro estilizado, lo cual se puede visualizar en la Fig. 6 Diagrama de flujo Retrato hablado mediante sistemas lineales.

### 3.3.2.1 Diagrama de flujo del 1. Preprocesamiento e implementación en Python

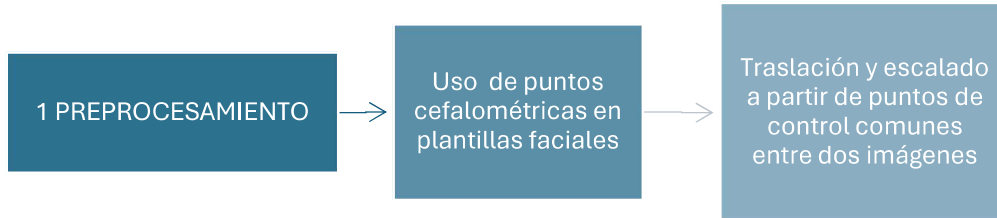


Fig. 7 Diagrama de flujo 1 Preprocesamiento

La etapa de preprocesamiento (Fig. 7. Diagrama de flujo 1 Preprocesamiento) consiste en la segmentación, alineación geométrica y normalización de las diferentes partes faciales seleccionadas. El sistema solicita la selección manual de puntos cefalométricos equivalentes en la imagen base del rostro y en el componente facial a integrar. Estos puntos, etiquetados por el usuario, se emplean para calcular un factor de escala y una traslación media, garantizando que el componente facial coincida en proporciones reales con la estructura global del rostro.

Luego se aplica:

- Cálculo de distancias entre puntos homologados
- Estimación de una escala promedio mediante relaciones geométricas
- Ajuste espacial por traslación para obtener alineación
- Inserción en la plantilla del rostro respetando continuidad morfológica

Esto puede escribirse como la siguiente formulación (ver ecuación 60):

$$f'(x, y) = f(s(x, y)) + t \dots \dots \dots (60)$$

Donde:

$s$  es la transformación de escala

$t$  es el vector de traslación  
 $f'(x,y)$  es el componente normalizado dentro del rostro

Finalmente, se realiza la integración del componente en la imagen base evitando píxeles de fondo no deseados.

La implementación se desarrolló en Python utilizando las librerías OpenCV y NumPy. El procedimiento permite la selección interactiva de puntos cefalométricos en la plantilla del rostro y en cada componente facial. A partir de ellos, se calcula el factor de escala mediante el promedio de las proporciones de distancia entre pares de puntos equivalentes, y posteriormente se obtiene la traslación media para corregir la posición del componente en el rostro. Finalmente, se realiza la integración pixel a pixel en la plantilla facial, evitando la superposición de fondo y garantizando la continuidad anatómica. Se anexa código en Apéndice II (Proceso para selección interactiva de puntos cefalométricos en I plantilla y componente parte facial).

### 3.3.2.2 Diagrama de flujo de 2. Clasificación de tipos de rostro y partes de rasgos faciales

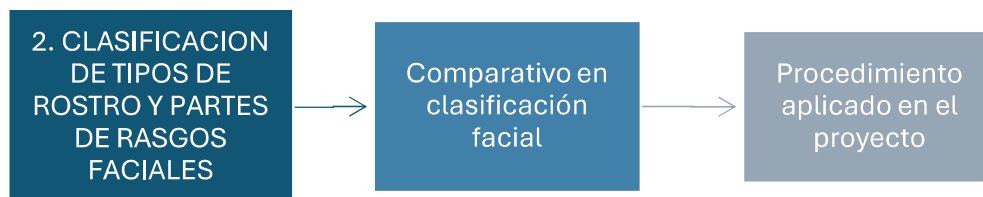


Fig. 8 Diagrama de flujo 2 Clasificación de tipos de rostro y partes de rasgos faciales

El proceso de clasificación anatómica constituye la primera fase del sistema propuesto para la construcción del retrato hablado mediante sistemas lineales. Como se observa en la Fig. 8 Diagrama de flujo Clasificación de tipos de rostro y partes de rasgos faciales, en esta etapa se realiza una categorización inicial del tipo global de rostro, seguida de la segmentación y clasificación morfológica de los rasgos faciales principales, que posteriormente serán usados como piezas modulares dentro del ensamblaje final.

La clasificación morfológica se basa en referencias cefalométricas, las cuales permiten definir relaciones proporcionales del rostro humano y asegurar que la superposición lineal de componentes mantenga coherencia anatómica. Este procedimiento reduce errores de simetría, deformaciones indeseadas y desalineación durante el proceso de integración.

Para llevar a cabo esta clasificación se utilizó la base de datos, que cuenta con más de 30,000 rostros de distintos géneros, edades y características étnicas, con condiciones de iluminación homogénea. A partir de dicha base se realizó la:

- a) Obtención del dataset: Selección de muestras con representación adecuada de variabilidad facial. Human Faces disponible en Kaggle [40]
- b) Detección de landmarks faciales: Identificación de ojos, nariz, labios, mentón, cejas y contorno mediante puntos anatómicos de referencia.
- c) Segmentación y extracción de regiones faciales: Uso de *bounding boxes* definidos por landmarks para separar rasgos faciales anatómicamente relevantes.
- d) Clasificación morfológica del rasgo: Agrupación en categorías (ej.: labios delgados/gruesos, nariz fina/recta/anchada) con validación visual.

Se tomaron algunos rostros de la base de datos Human Faces disponible en Kaggle [40], un rostro por cada tipo de parte, dichas partes del rostro fueron obtenidas de forma manual. El uso de instancias pequeñas en las pruebas de algoritmos es una práctica fundamental en ingeniería de software y ciencias de la computación, centrada en la eficiencia, la depuración y la validación lógica. Las instancias pequeñas permiten verificar la corrección básica sin el costo computacional ni la complejidad de los grandes conjuntos de datos.

e) Construcción de base organizada para el sistema: Cada tipo y sub-tipo anatómico se almacena en carpetas individuales, facilitando su vinculación al algoritmo principal mediante transformaciones lineales.

Este proceso asegura que los elementos faciales empleados en la reconstrucción digital sean compatibles en escala, morfología y estilo, antes de su procesamiento espacial y frecuencial en etapas posteriores.

### 3.3.2.3 Diagrama de flujo 3. Ejecución de Filtrado

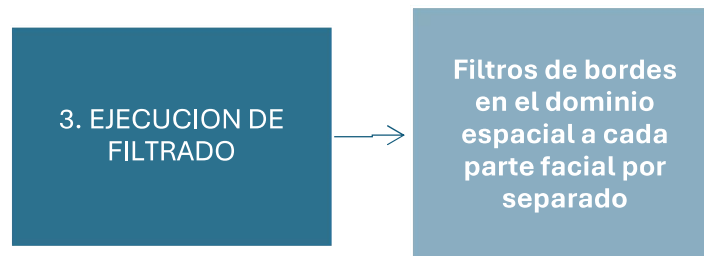


Fig. 9 Diagrama de flujo 3 Ejecución de Filtrado

En esta etapa del proceso se aplican los filtros responsables del realce y representación artística del retrato hablado. La ejecución del filtrado se

visualiza en la fig. 9 Diagrama de flujo 3 Ejecución de Filtrado. Primero, cada componente facial es sometido a filtros espaciales para la detección de bordes y el realce de la estructura anatómica dominante. Posteriormente, la información obtenida se transforma al dominio de la frecuencia con el fin de reducir ruido y mejorar la definición de detalles esenciales para la identificación facial.

En el dominio espacial se aplican los siguientes filtros derivados del capítulo 2.1.4.3 Filtros de realce (Sobel, Prewitt, Laplaciano, Dodge & Burn, Canny, XDoG y Pencil Sketch)

- Sobel y Prewitt → estimación del gradiente y contornos primarios\*
- Laplaciano → énfasis en cambios abruptos de intensidad
- Canny → bordes optimizados y supresión de no-máximos
- Filtros artísticos (*Dodge & Burn*, XDoG, Pencil Sketch) estilización tipo boceto, útil en forense para reconocimiento visual

Este conjunto de filtros permite capturar los bordes relevantes —nariz, labios, cejas, silueta facial— y a la vez suavizar regiones uniformes que no aportan a la identificación.

Posteriormente, se realiza la Transformada de Fourier (TF) para evaluar la distribución espectral de las características detectadas. En dicho espacio se aplican filtros pasa-altas que eliminan frecuencias bajas asociadas a iluminación o ruido difuso, manteniendo únicamente frecuencias altas que representan contornos anatómicos. Finalmente, a través de la Transformada Inversa de Fourier ( $TF^{-1}$ ), la imagen filtrada regresa al dominio espacial, lista para la etapa de integración y superposición con otros componentes faciales.

A continuación, se explica a detalle el flujo general del script aplicación de filtros espaciales Apéndice III (Script flujo general de aplicación de filtros espaciales).

1. Carga de imagen de la parte facial (boca) y conversión a escala de grises.
2. Aplicación de cuatro métodos de estilización/realce de bordes:
  - M1: Canny (bordes nítidos).
  - M2: Dodge (y opcionalmente Burn) para efecto boceto suave.
  - M3: XDoG para líneas artísticas definidas.
  - M4: Pencil Sketch (OpenCV) para textura de lápiz.
3. Visualización comparativa en una grilla 2×3 para análisis cualitativo.

Se trabaja en grises porque los detectores de borde y los modelos de boceto operan sobre luminancia.

### **M1) Boceto con Canny (bordes limpios y binarios)**

```
imagen_suavizada = cv2.GaussianBlur(imagen_gris, (5,5), 0)
```

```
bordes = cv2.Canny(imagen_suavizada, 50, 150)
```

```
boceto = cv2.bitwise_not(bordes)
```

- Cómo “se obtiene” el filtro: Canny implementa internamente gradiente (Sobel), supresión de no-máximos y umbralización por histéresis. En código, lo invocamos con `cv2.Canny`.
- Parámetros clave:
  - `GaussianBlur (5×5)` reduce ruido para evitar bordes falsos.
  - `threshold1=50, threshold2=150`: umbrales bajo/alto. Ajustarlos según contraste del rasgo.

- Salida: mapa de bordes binario, invertido para fondo blanco.
- Cuando usarlo: contornos limpios de labios/dientes; útil como “canal de referencia” por su estabilidad.

## **M2) Boceto con Dodge (& Burn) (trazo suave tipo boceto)**

```
imagen_invertida = cv2.bitwise_not(imagen_gris)
```

```
imagen_blur = cv2.GaussianBlur(imagen_invertida, (21, 21), 0)
```

```
def dodge (front, back):
```

```
    return cv2.divide(front, 255 - back, scale=256)
```

```
boceto = dodge (imagen_gris, imagen_blur)
```

- Cómo se obtiene: el efecto dodge digital se implementa como división de la imagen original por una versión invertida y suavizada; realza luces finas como si fueran trazos de lápiz.
- Parámetros:
  - Kernel grande (21,21) produce sombreado suave (puede bajarse a 11–15 para más detalle).
  - `cv2.divide(..., scale=256)` controla el rango final.
- Burn (opcional): si deseas añadir oscurecido local (volver más “volumétrico”), puedes sumar:
- `sombra = cv2.GaussianBlur(boceto, (9,9), 0)`
- `boceto = cv2.addWeighted(boceto, 0.7, sombra, 0.3, 0)`
- Salida: boceto suavizado, excelente para retratos.

- Cuando usarlo: cuando se busca estética artística y continuidad de tonos (tu filtro principal de estilización).

### **M3) Boceto con XDoG (líneas artísticas y controlables)**

```
g1 = cv2.GaussianBlur(imagen_gris, (0,0), sigma)
```

```
g2 = cv2.GaussianBlur(imagen_gris, (0,0), sigma*1.6)
```

```
dog = g1 - g2
```

```
dog = dog.astype(np.float32) / 255.0
```

```
e = 1.0 + np.tanh(k * (dog - epsilon))
```

```
e = e / e.max()
```

```
boceto = cv2.bitwise_not ((e * 255).astype(np.uint8))
```

- Cómo se obtiene: XDoG extiende DoG (diferencia de gaussianas) con una no linealidad tipo tanh y umbral suave; produce contornos con aspecto de tinta o lápiz.
- Parámetros:
  - sigma: escala del suavizado base (0.5–1.2 para rasgos finos).
  - 1.6\*sigma: relación típica para DoG.
  - k: ganancia de realce (valores grandes endurecen el borde).
  - epsilon: umbral de activación (controla qué tanto del fondo se vuelve blanco).
- Salida: líneas nítidas sobre fondo blanco.

- Cuando usarlo: delinear contornos dominantes (labio, comisuras, contorno dental) con estilo ilustrativo.

#### **M4) Pencil Sketch (OpenCV) – textura de lápiz**

boceto\_gris, boceto\_color = cv2.pencilSketch(

imagen\_boca, sigma\_s=60, sigma\_r=0.07, shade\_factor=0.05)

- Cómo se obtiene: función de OpenCV que combina suavizado bilateral y sombreado para simular lápiz.
- Parámetros:
  - sigma\_s (escala espacial): mayor → trazos más suaves.
  - sigma\_r (rango): controla preservación de bordes (0.05–0.1 típico).
  - shade\_factor: cantidad de sombreado.
- Salida: boceto continuo con textura de lápiz.
- Cuando usarlo: cuando buscas naturalidad del trazo sobre zonas con gradientes suaves.

#### **Comparación y presentación de resultados**

El script genera una figura 2×3 con: original, gris, Canny, Dodge, XDoG y Pencil Sketch. Esta visual comparativa permite elegir el método más adecuado por rasgo facial antes del ensamblaje:

- Canny: geometría nítida y delgada.
- Dodge (& Burn): boceto suave y realista (ideal para retrato).

- XDoG: línea expresiva y controlable (cartoon/ink).
- Pencil Sketch: textura de lápiz, percepción natural.

Los filtros espaciales se implementaron en Python con OpenCV y NumPy. Canny se utilizó como detector robusto de bordes; Dodge (& Burn) como estilización de boceto mediante división de imagen invertida y suavizada; XDoG como extensión de DoG con umbralización suave para líneas controladas; y Pencil Sketch (OpenCV) para simular textura de lápiz. Los parámetros se ajustaron empíricamente por rasgo (boca) para maximizar la legibilidad anatómica del trazo y su utilidad forense.

#### 3.3.2.4 Diagrama de flujo 4. Restauración y generación de rostros



Fig. 10 Diagrama de flujo 4 Restauración facial mediante superposición lineal y reconstrucción en dominio espacial a partir de la Transformada Inversa de Fourier

En esta etapa (Fig. 10 Diagrama de flujo 4 Restauración facial mediante superposición lineal y reconstrucción en dominio espacial a partir de la Transformada Inversa de Fourier), las partes faciales previamente filtradas y alineadas son integradas en una plantilla base utilizando operaciones lineales

de superposición. Cada componente facial se coloca en su posición anatómica correspondiente mediante puntos cefalométricos de referencia. Posteriormente, la composición se transforma al dominio frecuencial, donde se ejecuta la suma espectral de todas las señales de imagen. Finalmente, mediante la Transformada Inversa de Fourier se obtiene el retrato hablado resultante en el dominio espacial, reconstruido con sus bordes estilizados y coherencia morfológica.

Este proceso implementa un modelo lineal de integración facial (ver ecuación 61):

$$I_{\text{resultado}} = \mathcal{F}^{-1}[\sum_{i=1}^n \mathcal{F}(I_i)] \dots \dots \dots (61)$$

Donde cada  $I_i$  representa una parte facial filtrada y alineada, y  $\mathcal{F}$ ,  $\mathcal{F}^{-1}$  la Transformada de Fourier directa e inversa.

El flujo que sigue el usuario en la interfaz es:

1. Seleccionar plantilla (tipo de rostro)
2. Seleccionar partes faciales requeridas
3. Registrar automáticamente los puntos cefalométricos
4. Superposición geométrica + filtrado espacial
5. Suma de componentes en el dominio frecuencial
6. Generación del retrato hablado final

### **Explicación del código implementado**

La funcionalidad principal se encuentra en la ecuación 62, las acciones en la Tabla 6. Acciones y resultados de la función `def _suma_ imagenes_ dominio_frecuencial (parts_data: list)`: El código se visualiza en Apéndice IV (Script Generación de rostros):

*def suma\_imagenes\_dominio\_frecuencial(part\_data: list): .....(62)*

<b>Fase</b>	<b>Acción realizada</b>	<b>Resultado</b>
A	Carga de plantilla base	Imagen inicial en gris
B	Filtrado de cada parte	Estilización tipo boceto (Dodge & Burn)
C	Alineación geométrica	Escalado + traslación según índices cefalométricos
D	Transformada de Fourier	Conversión a dominio frecuencial
E	Suma espectral	Integración lineal de señales
F	TF Inversa	Reconstrucción facial en plano espacial
G	Normalización	Imagen final en 0–255

Tabla 6. Acciones y resultados de la función *def\_suma\_imagenes\_dominio\_frecuencial* (parts\_data: list):

Módulo clave 1: Colocación de cada parte en su ubicación correcta

*output = colocar\_parte\_en\_plantilla(...)*

- Compara posiciones de puntos cefalométricos comunes
- Calcula factor de escala promedio (ecuación 63):

$$s = \frac{\text{distancia en plantilla}}{\text{distancia en parte}} \dots\dots\dots (63)$$

- Calcula traslación media (ecuación 64)

$$t = P_{\text{plantilla}} - s * P_{\text{parte}} \dots\dots\dots (64)$$

- Aplica la transformación: escala + traslación, sin deformar la anatomía

## Módulo clave 2: Superposición en frecuencia

```
f = np.fft.fft2(img)
```

```
fshift = np.fft.fftshift(f)
```

```
suma_frecuencial += fshift
```

Justificación teórica superposición en dominios espacial y frecuencial (tabla 7):

Dominio espacial	Dominio frecuencial
Superponer imágenes puede introducir ruido local	La suma espectral permite fusión suave
Variación en iluminación perjudica	DC y bajas frecuencias compensadas
Flujos discontinuos entre partes	Alineación a nivel estructural

Tabla 7. justificación teórica superposición en dominios espacial y frecuencial

## Módulo clave 3: Reconstrucción facial con $TF^{-1}$

```
img_suma = np.fft.ifft2(...)
```

```
img_suma_norm = normalizar_grises(img_suma)
```

Transformación inversa = recuperar bordes estilizados

Normalización = asegura niveles válidos para visualización e impresión.



## **CAPITULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

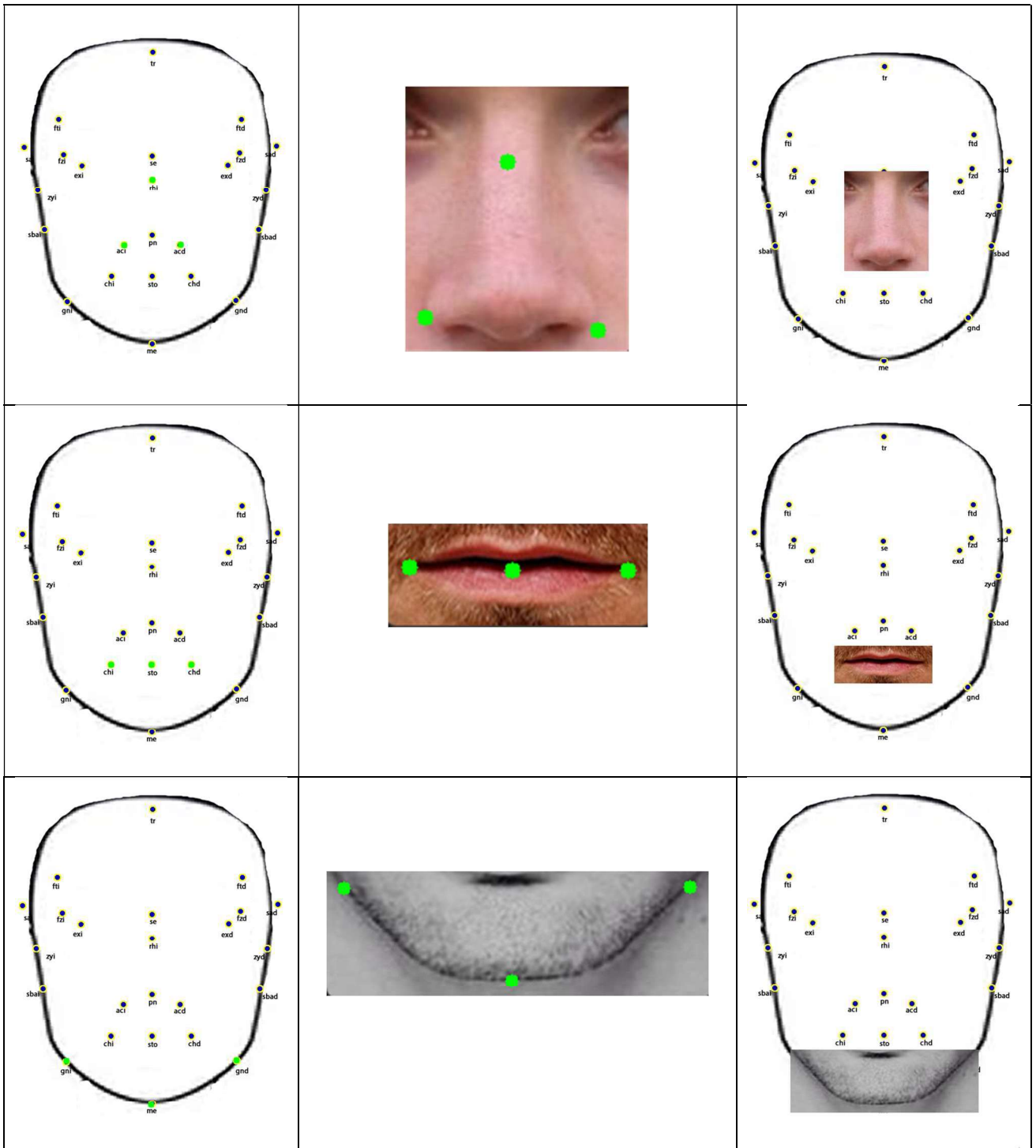
En este capítulo se exponen los resultados de la implementación del sistema propuesto, organizados en cuatro fases: preprocesamiento, filtrado espacial, refinamiento frecuencial y reconstrucción por principio de superposición. La evaluación del método incluye métricas cuantitativas para medir nitidez y preservación estructural, junto con un análisis visual de continuidad y semejanza anatómica. Finalmente, se comparan los resultados con enfoques existentes y se discute su aplicación en el contexto forense.

### **4.1 Resultados Fase I: Preprocesamiento de Imágenes Faciales**

El preprocesamiento inició con la definición, posicionamiento y escalado de los puntos cefalométricos entre la plantilla facial (tipo de rostro) y cada uno de los componentes faciales seleccionados. La correcta correspondencia entre puntos anatómicos permite asegurar que las partes faciales se integren posteriormente sin distorsión ni pérdida de coherencia morfológica.

En la Tabla 8. Correspondencia de puntos cefalométricos entre plantilla y partes faciales, se muestran los principales puntos cefalométricos utilizados en este proyecto para la fase de preprocesamiento, los cuales fueron seleccionados por su relevancia anatómica en la identificación del contorno facial, ojos, nariz, boca, orejas, mentón, etc. La información detallada con la nomenclatura completa y definición anatómica de los índices se incluye en el Apéndice V (Tabla de Índices Cefalométricos).





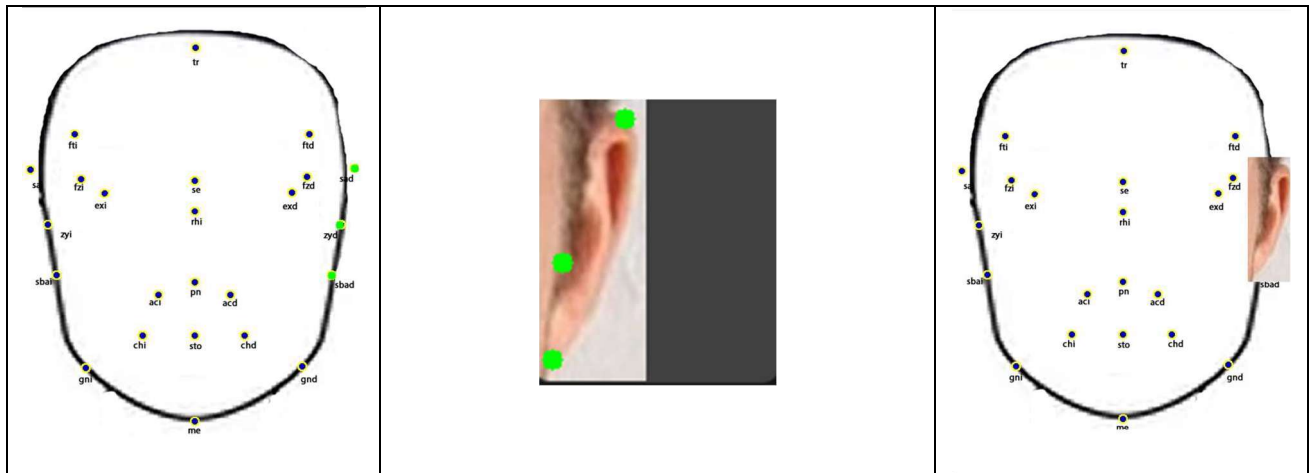


Tabla 8. Correspondencia de puntos cefalométricos entre plantilla y partes faciales

Para garantizar la interoperabilidad entre los diferentes tipos faciales del dataset, se realizaron transformaciones geométricas de escala y traslación basadas en la distancia media entre pares de puntos cefalométricos homologados, reduciendo así la pérdida de forma o proporción durante la fase de alineación.

La ejecución de este proceso se encuentra automatizada en el código desarrollado en Python, el cual se detalla en el Apéndice II (Proceso para selección interactiva de puntos cefalométricos en I plantilla y componente parte facial). Este código ya no se incluye dentro del cuerpo principal del capítulo para evitar saturación técnica y mejorar la fluidez en la lectura del documento.

En conclusión, la fase de preprocesamiento logró una normalización exitosa de escala, posición y formato visual de los componentes faciales, estableciendo así la base para un ensamblaje posterior anatómicamente consistente y una correcta aplicación de los filtros espaciales en las siguientes fases.

## **4.2 Resultados Fase II: Filtrado Espacial**

### **4.2.1 Comparativa visual entre filtros Canny, Dodge & Burn, XDoG y Pencil Sketch.**

En esta fase se analizaron distintos métodos de filtrado espacial aplicados a cada región anatómica del rostro, con el objetivo de identificar el que preserve mejor las características morfológicas fundamentales para la construcción del retrato hablado. Los métodos evaluados fueron: Canny, Dodge & Burn, XDoG y Pencil Sketch.

La evaluación cualitativa se realizó considerando los siguientes criterios:

- Nitidez de contorno
- Continuidad de trazo
- Volumen y sombreado anatómico
- Nivel de ruido en zonas planas
- Legibilidad facial necesaria para identificación visual

A continuación, se presentan las Tablas 9-15 (Tablas comparativas de filtrado espacial) donde se muestran resultados de los cuatro métodos sobre componentes faciales masculinos y femeninos: pelo, cejas, ojos, nariz, boca, mentón y orejas.




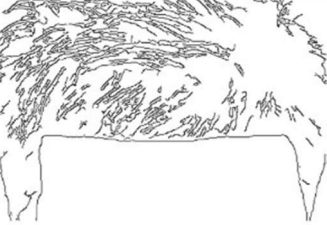
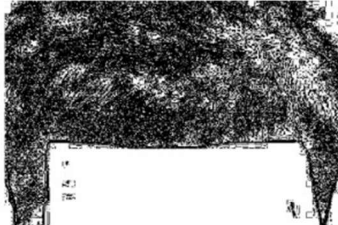
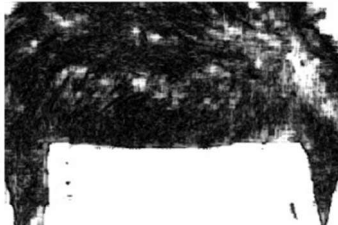





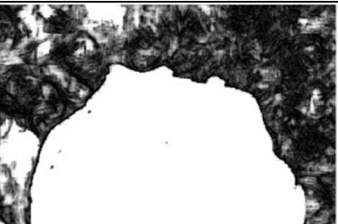
Tabla comparativa de métodos de filtrado aplicados al tipo de partes del rostro (hombre /mujer): 1) Pelo		
Original	Escala de grises	Método 1: Canny (bordes simples)
		
Método 2: Dodge & Burn (más realista)	Método 3: XDoG (estilo artístico)	Método: 4 Pencil Sketch (lápiz)
		
Original	Escala de grises	Método 1: Canny (bordes simples)
		
Método 2: Dodge & Burn (más realista)	Método 3: XDoG (estilo artístico)	Método: 4 Pencil Sketch (lápiz)
		

Tabla 9. Tabla comparativa filtrado espacial tipo rostro (pelo)



Tabla comparativa de métodos de filtrado aplicados al tipo de partes del rostro (hombre /mujer): 2) Cejas		
Original	Escala de grises	Método 1: Canny (bordes simples)
		
Método 2: Dodge & Burn (más realista)	Método 3: XDoG (estilo artístico)	Método 4: Pencil Sketch (lápiz)
		
Original	Escala de grises	Método 1: Canny (bordes simples)
		
Método 2: Dodge & Burn (más realista)	Método 3: XDoG (estilo artístico)	Método 4: Pencil Sketch (lápiz)
		

Tabla 10. Tabla comparativa filtrado espacial tipo rostro (Cejas)



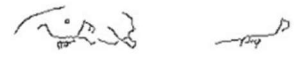
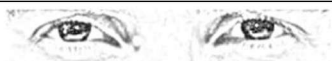








Tabla comparativa de métodos de filtrado aplicados al tipo de partes del rostro (hombre /mujer): 3) Ojos		
Original	Escala de grises	Método 1: Canny (bordes simples)
		
Método 2: Dodge & Burn (más realista)	Método 3: XDoG (estilo artístico)	Método 4: Pencil Sketch (lápiz)
		
Original	Escala de grises	Método 1: Canny (bordes simples)
		
Método 2: Dodge & Burn (mas realista)	Método 3: XDoG (estilo artístico)	Método 4: Pencil Sketch (lápiz)
		

Tabla 11. Tabla comparativa filtrado espacial tipo rostro (Ojos)


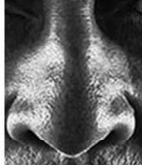
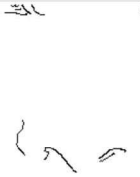

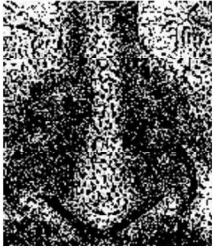

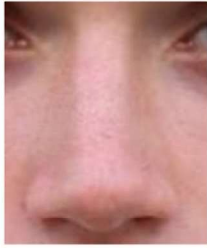



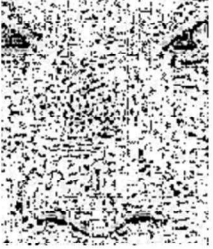

Tabla comparativa de métodos de filtrado aplicados al tipo de partes del rostro (hombre /mujer): 4) Nariz		
Original	Escala de grises	Método 1: Canny (bordes simples)
		
Método 2: Dodge & Burn (mas realista)	Método 3: XDog (estilo artístico)	Método: 4 Pencil Sketch (lápiz)
		
Original	Escala de grises	Método 1: Canny (bordes simples)
		
Método 2: Dodge & Burn (más realista)	Método 3: XDoG (estilo artístico)	Método: 4 Pencil Sketch (lápiz)
		

Tabla 12. Tabla comparativa filtrado espacial tipo rostro (Nariz)



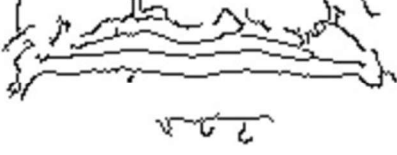


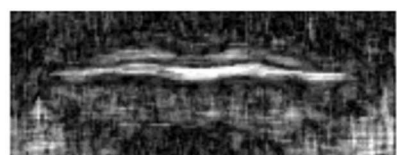

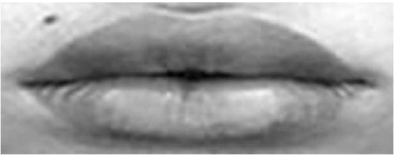
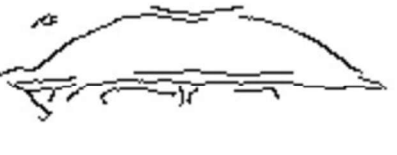


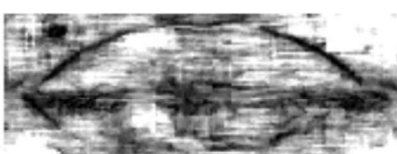
Tabla comparativa de métodos de filtrado aplicados al tipo de partes del rostro (hombre /mujer): 5) Boca		
Original	Escala de grises	Método 1: Canny (bordes simples)
		
Método 2: Dodge & Burn (más realista)	Método 3: XDoG (estilo artístico)	Método 4: Pencil Sketch (lápiz)
		
Original	Escala de grises	Método 1: Canny (bordes simples)
		
Método 2: Dodge & Burn (más realista)	Método 3: XDoG (estilo artístico)	Método 4: Pencil Sketch (lápiz)
		

Tabla 13. Tabla comparativa filtrado espacial tipo rostro (Boca)

Tabla comparativa de métodos de filtrado aplicados al tipo de partes del rostro (hombre /mujer): 6) mentón		
Original	Escala de grises	Método 1: Canny (bordes simples)
		
Método 2: Dodge & Burn (más realista)	Método 3: XDoG (estilo artístico)	Método: 4 Pencil Sketch (lápiz)
		
Original	Escala de grises	Método 1: Canny (bordes simples)
		
Método 2: Dodge & Burn (más realista)	Método 3: XDoG (estilo artístico)	Método: 4 Pencil Sketch (lápiz)
		

Tabla 14. Tabla comparativa filtrado espacial tipo rostro (Mentón)













Tabla comparativa de métodos de filtrado aplicados al tipo de partes del rostro (hombre /mujer): 7) Orejas		
Original	Escala de grises	Método 1: Canny (bordes simples)
		
Método 2: Dodge & Burn (más realista)	Método 3: XDoG (estilo artístico)	Método: 4 Pencil Sketch (lápiz)
		
Original	Escala de grises	Método 1: Canny (bordes simples)
		
Método 2: Dodge & Burn (más realista)	Método 3: XDoG (estilo artístico)	Método: 4 Pencil Sketch (lápiz)
		

Tabla 15. Tabla comparativa filtrado espacial tipo rostro (Orejas)

#### 4.2.2 Análisis cualitativo por filtro

Los resultados muestran que Canny ofrece líneas limpias pero escasas, resultando útil únicamente para contornos muy definidos como cejas u ojos. En contraste, XDoG genera trazos más expresivos y controlables, pero tiende a acentuar ruido en texturas complejas como cabello o piel.

Pencil Sketch produce resultados más naturales en áreas suavizadas, pero con pérdida de definición en estructuras finas como comisuras y fosas nasales.

El método Dodge & Burn logró la mejor combinación entre continuidad anatómica, suavidad y contraste funcional en prácticamente todas las partes, sin introducción perceptible de ruido. Este comportamiento motivó su selección como el método base del sistema propuesto. En la siguiente tabla 16. Evaluación cualitativa de filtros para retrato hablado se desglosan los filtros implementados.

Rasgo Facial	Canny	Dodge & Burn	XDoG	Pencil Sketch	Mejor opción
Pelo	✗	✓	⚠	⚠	Dodge & Burn
Cejas	✓	✓	✓	⚠	Canny / XDoG
Ojos	✓	✓	✓	✗	XDoG / Dodge & Burn
Nariz	⚠	✓	⚠	✗	Dodge & Burn
Boca	⚠	✓	✓	⚠	Dodge & Burn / XDoG
Mentón	✗	✓	⚠	⚠	Dodge & Burn
Orejas	⚠	✓	⚠	✗	Dodge & Burn

Tabla 16. Evaluación cualitativa de filtros para retrato hablado

- ✓ Excelente rendimiento
- ⚠ Parcial, depende del tipo de rostro
- ✗ No recomendable

En resumen, el método **Dodge & Burn** fue seleccionado como filtro espacial principal en el sistema, debido a que proporciona los trazos más adecuados

para cumplir el objetivo de identificación visual del retrato hablado. Cuando se requiere mayor definición de borde, especialmente en ojos y cejas, se complementa con XDoG o Canny, garantizando así resultados más robustos en las siguientes etapas del proceso.

### 4.3 Resultados Fase III. Fusión de Partes Faciales

Las imágenes filtradas fueron alineadas y fusionadas con base en el principio de superposición. Se combinó información de diferentes dominios para lograr una reconstrucción coherente del retrato hablado. Este proceso integró cada parte facial manteniendo proporciones anatómicas. En la tabla 17 se muestran Fusión Espacial vs. Fusión frecuencial, de acuerdo con las siguientes descripciones: hombre con rostro rectangular, pelo corto lacio, cejas arqueadas, ojos estrechos, nariz recta, boca pequeña labios gruesos, mentón alargado y orejas medianas sobresalientes.



Fusión Espacial	Fusión Frecuencial
	

Tabla 17. Fusión Espacial vs. Fusión Frecuencial

La suma en dominio espacial agrega intensidad: Cuando se suman imágenes en el dominio espacial, se suman directamente los valores de intensidad de los píxeles (N imágenes) (ver ecuación 65):

$$\text{Resultado}(x, y) = \sum_{i=1}^N \text{Imagen}_i(x, y) \dots\dots\dots (65)$$

Los valores se acumulan. Por ejemplo, si se suman 5 partes del rostro donde cada píxel tiene un valor promedio de 50, se obtienen valores de ~250, lo que satura la imagen (máximo 255 en imágenes de 8 bits) y produce ese efecto de exceso de brillo.

La suma en el dominio frecuencial (FFT), se manipulan componentes de frecuencia (magnitud y fase). La suma de espectros de frecuencia no acumula "brillo" de la misma manera porque no se suman intensidades directamente, sino se suma información de frecuencias que luego se reconstruye mediante la transformada inversa (ver ecuación 66 y 67).

$$F_{\text{resultado}} = \sum_{i=1}^N F\{I_i\} \dots\dots\dots (66)$$

$$I_{\text{resultado}} = F^{-1}\{F_{\text{resultado}}\} \dots\dots\dots (67)$$

La suma de espectros de frecuencia + transformada inversa no acumula intensidad de la misma manera porque se trabaja con información de frecuencias, magnitudes y fases, no intensidades directas.

En la tabla 17 se puede observar que aunque la imagen de la izquierda es normalizada (fusión espacial) se pierde importante información, mientras que la fusión frecuencial nos proporciona una mejor superposición.

Las posibles combinaciones se visualizan en la Tabla 18: Tipos de rostro y clasificación de partes del rostro (hombre-mujer). En Apéndice VI (Tipos de rostro y clasificación de tipos de partes del rostro nomenclaturas hombre/mujer)

El boceto es construido por un tipo de rostro y siete partes que lo conforman.

TIPO DE ROSTRO		PARTES DEL ROSTRO	1.Pelo	cortolacio	cortorizado					
			1.Redondo	2.Cejas	sobresalientes	arqueadas	triangular	recto	roto	
			2.Oval	3.Ojos	estrechos	almendrados	asiáticos	prominentes	pequeños	
			3.Triangular	4.Nariz	recta	aguileña	chata	respingona	abultada	
			4.Cuadrado	5.Boca	pequeña con labios delgados	pequeña con labios gruesos	mediana con labios delgados	mediana con labios gruesos	grande con labios delgados	grande con labios gruesos
			5.Rectangular	6.Menton	cuadrado	redondo	reducido	alargado	sobresaliente	
				7.Orejas	pequeñas normales	pequeñas sobresalientes	medianas normales	medianas sobresalientes	grandes normales	grandes sobresalientes

Tabla 18. Tipos de rostro y clasificación de partes del rostro (hombre/ mujer)

#### 4.3.1 Interfaz de usuario

La interfaz de usuario desarrollada permite al operador generar un retrato hablado digital mediante la selección progresiva de componentes faciales. El proceso está diseñado para simular la lógica utilizada por un perito dibujante o por el mismo usuario víctima de un delito (que es una de las ventajas que ofrece el método propuesto) pero bajo un enfoque computacional basado en sistemas lineales. Su funcionamiento se divide en las siguientes etapas:

##### 1) Selección de género (Hombre / Mujer)

El sistema filtra automáticamente la base de datos de rasgos faciales, mostrando únicamente las plantillas y partes del rostro correspondientes al género elegido. Esto asegura coherencia anatómica y evita combinaciones incompatibles (por ejemplo, mandíbula masculina con labios femeninos).

## 2) Selección de plantilla base (tipo de rostro)

El usuario elige una plantilla cefalométrica correspondiente a la forma general de la cabeza: Rostro rectangular, redondo, cuadrado, ovalado o triangular. Cada plantilla contiene puntos cefalométricos predefinidos, usados como referencia geométrica para alinear y escalar los rasgos restantes.

## 3) Selección de partes faciales (proceso iterativo):

El usuario selecciona, una por una, las 7 partes del rostro disponibles: pelo, cejas, ojos, nariz, boca, mentón y orejas.

Cada vez que se selecciona una parte, el sistema internamente:

- Extrae filtrado (Dodge & Burn)
- Extrae y almacena sus índices cefalométricos
- Registra la imagen en una lista interna `parts_data[]` que servirá posteriormente para la reconstrucción.

4) Construcción del retrato en el dominio frecuencial (operación interna). Una vez seleccionadas las partes, el sistema ejecuta automáticamente:

1. - Transformada de Fourier (FT)
2. Alineación morfológica mediante índices cefalométricos
3. - Principio de superposición (suma de espectros)<sup>4</sup>
4. - Filtro de refinamiento (si aplica)
5. - Transformada inversa ( $FT^{-1}$ )

Esto permite generar el rostro compuesto sin degradación acumulativa de bordes, a diferencia de la superposición directa en el plano espacial.

5) Visualización del retrato final en el plano espacial. El resultado final se muestra en la sección derecha de la interfaz, ya reconstruido y con estética tipo boceto. Desde esta etapa el usuario puede:

- Reiniciar el proceso (Reset)
- Guardar o confirmar el retrato (Finalizar)

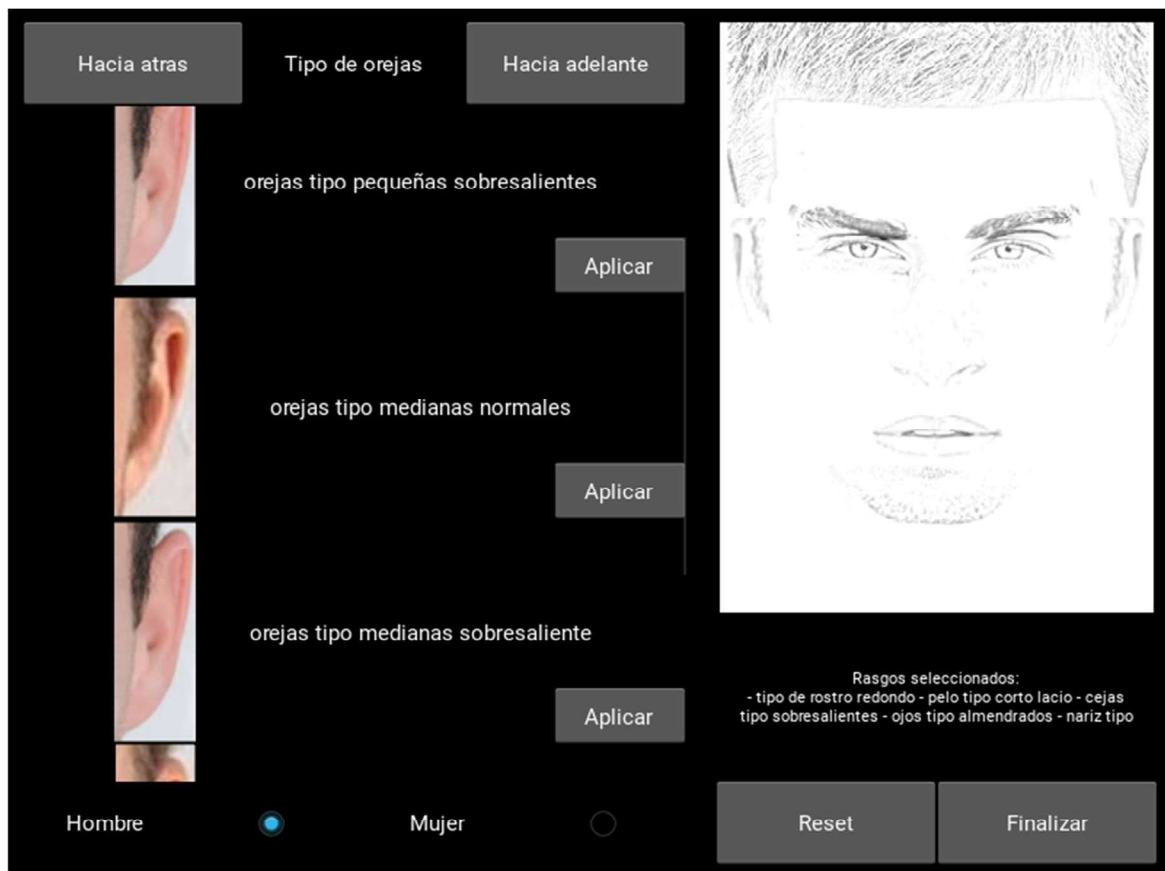


Fig. 11 Vista de interfaz de usuario

La interfaz fig. 11, no solo automatiza el proceso de composición facial, sino que también garantiza que la reconstrucción siga un modelo matemático reproducible, eliminando la subjetividad del dibujante y permitiendo obtener un retrato hablado consistente, escalable y científicamente verificable.

#### **4.3.2 Reconstrucción de retrato hablado en Interfaz de usuario (Ejemplos)**

En esta sección se presentan ejemplos prácticos de reconstrucción de retratos hablados generados mediante la interfaz de usuario desarrollada. Cada retrato está compuesto a partir de la selección secuencial de las partes faciales disponibles en la base de datos (pelo, cejas, ojos, nariz, boca, mentón y orejas), alineadas sobre una plantilla cefalométrica correspondiente al tipo de rostro elegido.

Los ejemplos se han configurado con descripciones detalladas que imitan la forma en que un testigo o perito podría especificar la apariencia del sujeto. Este enfoque permite demostrar la capacidad del sistema para sintetizar retratos coherentes a partir de características faciales individuales y combinar múltiples rasgos preservando la continuidad anatómica. A continuación, se muestran cuatro ejemplos Tabla 19. Reconstrucción de retrato hablado en Interfaz de usuario (ejemplos hombres) y Tabla 19. Reconstrucción de retrato hablado en Interfaz de usuario (ejemplos mujeres) generados bajo este proceso, acompañados de sus descriptores correspondientes.



Retrato hablado	Descripciones
	<p>Hombre- tipo <b>rostro</b> rectangular - <b>pelo</b> tipo corto rizado - <b>cejas</b> tipo roto - <b>ojos</b> tipo asiáticos - <b>nariz</b> aguileña - <b>boca</b> tipo pequeña labios gruesos - <b>mentón</b> tipo redondo, <b>orejas</b> tipo pequeñas sobresalientes.</p>
	<p>Hombre- tipo <b>rostro</b> triangular - <b>pelo</b> tipo corto rizado- <b>cejas</b> tipo recto - <b>ojos</b> tipo prominentes - <b>nariz</b> abultada - <b>boca</b> tipo grande labios gruesos - <b>mentón</b> tipo redondo, <b>orejas</b> tipo grandes normales.</p>

Tabla 19. Reconstrucción de retrato hablado en Interfaz de usuario (ejemplos hombres)



Retrato hablado	Descripciones
	<p>Mujer- tipo <b>rostro</b> ovalado - <b>pelo</b> tipo corto rizado- <b>cejas</b> tipo triangular- <b>ojos</b> tipo pequeños - <b>nariz</b> abultada - <b>boca</b> tipo grande labios delgados - <b>mentón</b> tipo cuadrado, <b>orejas</b> tipo pequeñas sobresalientes.</p>
	<p>Mujer- tipo <b>rostro</b> cuadrado - <b>pelo</b> tipo corto lacio - <b>cejas</b> tipo roto - <b>ojos</b> tipo asiáticos - <b>nariz</b> chata - <b>boca</b> tipo mediana labios gruesos - <b>mentón</b> tipo cuadrado, <b>orejas</b> tipo pequeñas sobresalientes.</p>

Tabla 20. Reconstrucción de retrato hablado en Interfaz de usuario (ejemplos mujeres)

## 4.4 Validación Experimental

### 4.4.1 Diseño experimental

El objetivo de esta validación es comprobar que el sistema propuesto es capaz de generar retratos hablados digitalizados que conserven coherencia anatómica, mantengan legibilidad estructural del trazo y presenten un nivel de detalle suficiente para tareas de identificación visual o reconstrucción forense. La evaluación se realizó sobre un conjunto de  $N = 50$  retratos sintéticos (hombres y mujeres), abarcando cinco tipos de morfología facial (ovalado, triangular, cuadrado, rectangular y redondo) con variaciones controladas en rasgos como nariz, boca, cejas, cabello y densidad de textura.

Para cuantificar objetivamente la calidad de los trazos resultantes, se utilizaron tres métricas ampliamente aceptadas en análisis de bordes y evaluación de métodos de realce estructural:

1. Energía de Bordes (Edge Energy): Mide la suma total de magnitudes de gradiente detectadas en la imagen. Un mayor valor implica que la estructura de bordes es más fuerte y definida. Esta métrica es utilizada en validaciones de métodos de realce de contorno y sketching artificial [30], [31], [42].
2. Densidad de Trazos (%): Representa el porcentaje de píxeles clasificados como borde sobre el área total de la imagen. Se utiliza para evaluar la presencia o ausencia de trazos significativos y para definir si la imagen tiene suficiente información visual para ser interpretada [13], [26]

3. **Contraste Bordes-Fondo:** Define la separación media en niveles de intensidad entre los bordes detectados y el fondo blanco. En imágenes tipo “line art”, un mayor contraste se asocia con mayor legibilidad perceptual.

Las métricas seleccionadas guardan una relación directa con la naturaleza del método propuesto. Dado que el sistema se fundamenta en el realce de contornos mediante filtrado espacial (Sobel, Canny, XDoG, Dodge & Burn) y en la manipulación de altas frecuencias a través de la Transformada de Fourier, la calidad del retrato hablado depende principalmente de la definición estructural de sus bordes y no del realismo fotográfico.

En este sentido, la Energía de Bordes evalúa la intensidad global de los contornos generados por el filtrado, la Densidad de Trazos cuantifica la cantidad de información lineal presente —característica esencial de los bocetos forenses— y el Contraste Bordes-Fondo mide la legibilidad perceptual del dibujo.

En conjunto, estas métricas permiten validar objetivamente que el sistema produce representaciones tipo “line art” con trazos definidos, suficientes para la identificación visual y coherentes con el propósito criminalístico del retrato hablado.

Los resultados consolidados para las 50 muestras se presentan en la Tabla 21. Resultados de métricas objetivas de calidad de bordes Energía de bordes, Densidad de trazos y Contraste, así como su comportamiento estadístico en las Figuras 12, 13 y 14. Los resultados de métricas objetivas de calidad de bordes: Energía de bordes, Densidad de trazos y Contraste de las 50 muestras de retratos se encuentran en Apéndice VII, así como las imágenes de muestras en el Apéndice VIII.

Métrica: Energía de Bordes		Resultados
Como se calcula	Suma de las magnitudes del gradiente.	<div style="background-color: #fff9c4; padding: 5px;">           □ Energía de Bordes:            Media: 7104.20            Desv. Est: 1197.25            Rango: [5149.10, 9570.20]         </div>
Qué indica	Cantidad total de trazo detectado	(7104.20 promedio)
Interpretación esperada	Valores altos = bordes más definidos	Rango: 5149.10 - 9570.20  Mayor energía: Imágenes de mujeres con cabello rizado (más gradientes)  Menor energía: Imágenes de hombres con cabello rizado y labios delgados
Métrica: Densidad de Trazos (%)		Resultados
Como se calcula	$(\text{Píxeles de borde} / \text{píxeles totales}) \times 100$	<div style="background-color: #fff9c4; padding: 5px;">           □ Densidad de Trazos (%):            Media: 8.05%            Desv. Est: 0.99%            Rango: [6.34%, 10.04%]         </div>
Qué indica	Proporción de imagen con líneas detectadas	El 8% de densidad es apropiado para bocetos tipo retrato hablado, que son principalmente fondo blanco con líneas negras finas y espaciadas. El objetivo 15-30% es para imágenes con más detalle/textura.
Interpretación esperada	< 5% = muy tenue · 15–30% = rango óptimo tipo lineart	<b>(8.05% promedio)</b>  Rango: 6.34% - 10.04%  Mejor (más trazos): Imágenes con cabello lacio.  Peor (menos trazos): Imágenes con cabello rizado y labios delgados.
Métrica: Contraste (0–255)		Resultados
Como se calcula	Promedio(bordes) – Promedio(fondo)	<div style="background-color: #fff9c4; padding: 5px;">           □ Contraste:            Media: -35.03            Desv. Est: 8.41            Rango: [-48.60, -21.14]         </div>

Qué indica	Separación de intensidad entre trazo y blanco	(-35.03 promedio)
Interpretación esperada	Más alto = trazos más visibles	Rango: -48.60 a -21.14 (valores negativos = trazos más oscuros que fondo)  Mayor contraste: Imágenes de mujeres con cabello rizado (trazos muy oscuros)  Menor contraste: Imágenes de hombres con cabello lacio (trazos más claros).

Tabla 21. Resultados de métricas objetivas de calidad de bordes Energía de bordes, Densidad de trazos y Contraste

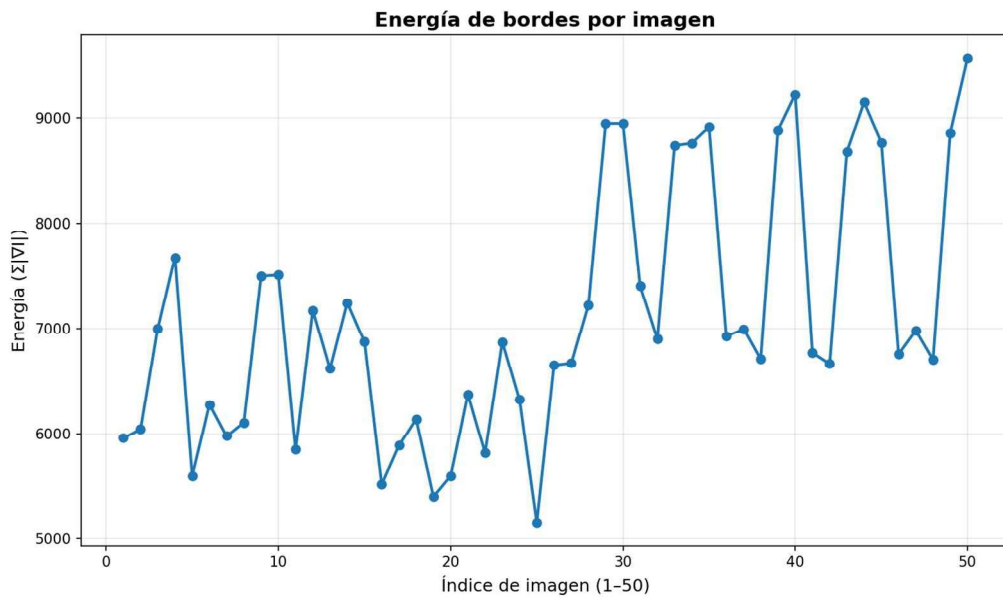


Fig. 12 Grafica métrica: Energía de Bordes

En la gráfica, Fig.12 Energía de bordes por imagen muestra

- Eje X: índice de imagen (1–50).
- Eje Y: Energía de bordes (suma de magnitudes de gradiente).

Mide qué tan “fuertes” y “marcados” están los bordes del boceto. Valores más altos (bordes más definidos, trazos más intensos, contornos más “presentes”). Valores más bajos (trazos más suaves o menos detectables (debido a poco contraste, exceso de suavizado, o trazos muy ligeros)).

Se observa en la gráfica:

- Tendencia a subir en la segunda mitad (aprox. después de la imagen 25).
- Hay picos altos hacia el final ( $\approx$  imágenes 29–31, 40–45 y 50), lo que sugiere que en esos retratos el método produjo contornos más fuertes (por ejemplo: cejas/pelos más marcados, o parámetros que realzan bordes).

Se concluye:

“La energía de bordes se mantiene en un rango estable con incrementos en ciertas muestras, lo que indica que el sistema logra trazos definidos y continuidad estructural; los picos corresponden a rostros con rasgos de alto contraste o mayor complejidad (cabello, cejas o contornos más pronunciados).”

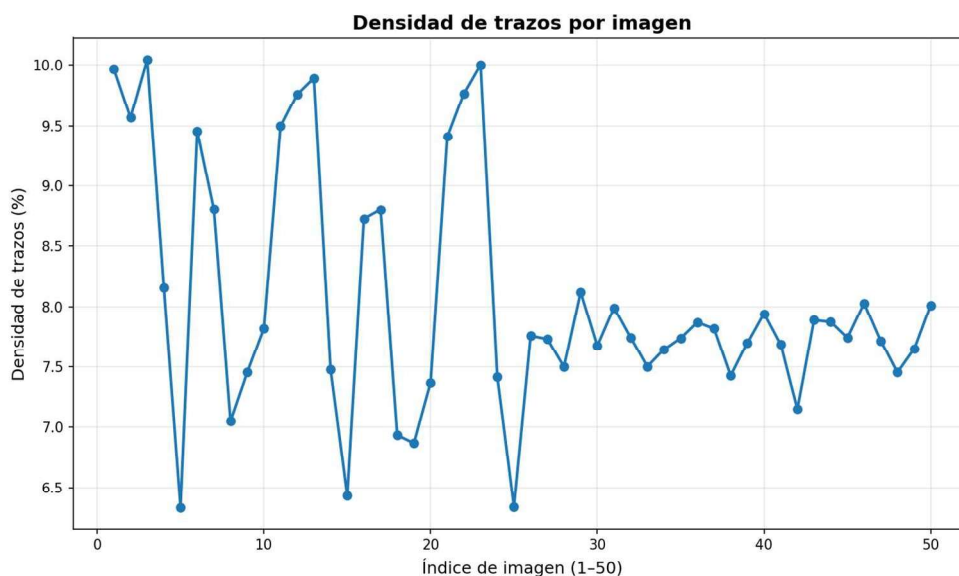


Fig. 13 Grafica métrica: Densidad de trazos%

En la gráfica, Fig.13 Densidad de trazos por imagen muestra

- Eje X: índice de imagen (1–50).
- Eje Y: porcentaje de pixeles detectados como borde.

Mide cuánta “tinta” o cuánta línea aparece en el boceto. Densidad alta (hay muchos bordes: puede verse más detallado, pero si sube demasiado puede verse “saturado” -ruido o sobre trazado-). Densidad baja (puede verse limpio, pero si baja mucho puede perder rasgos y legibilidad).

Se observa en la gráfica:

- En la primera parte ( $\approx 1-25$ ) hay más variación y varios valores cercanos a 9–10%.
- En la segunda parte ( $\approx 26-50$ ) se estabiliza bastante alrededor de  $\sim 7.4-8.0\%$ , con poca dispersión.

Este patrón significa que el método propuesto logra consistencia en la densidad para muchas imágenes (buena señal para “reproducibilidad visual”). Con respecto a que baje un poco y se estabilice indica que el filtro/umbral evita ruido permitiendo dejar pasar solo trazos relevantes.

Se concluye:

“La densidad de trazos se mantiene en rangos controlados y tiende a estabilizarse en la mayoría de las muestras, lo que sugiere que el método evita saturación de líneas y conserva contornos suficientes para identificación.

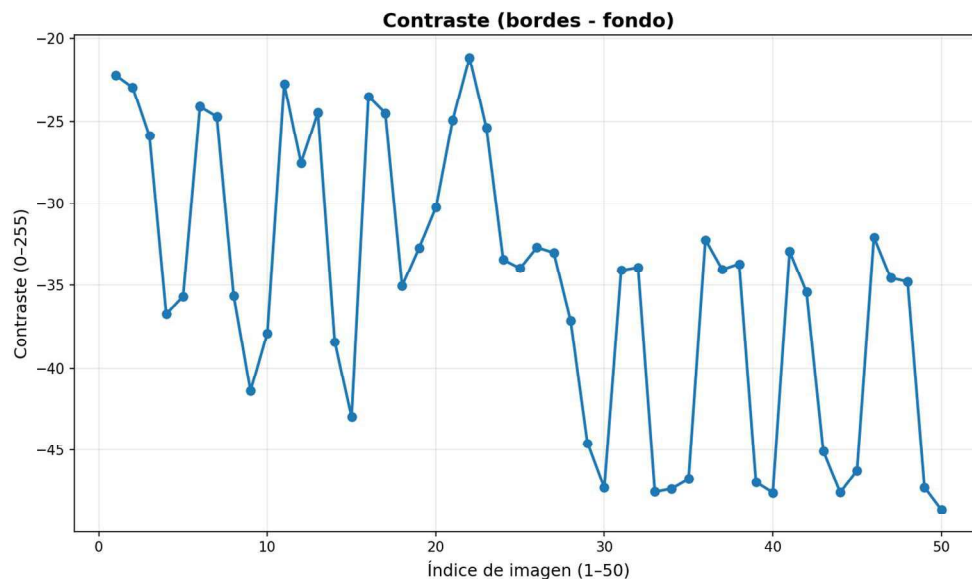


Fig. 14 Grafica métrica: Contraste

En la gráfica, Fig.14 Contraste (borde-fondo) por imagen muestra

- Eje X: índice de imagen (1–50).
- Eje Y: contraste en escala 0–255 (valores negativos)

Los valores negativos fueron obtenidos debido a que el cálculo fue  $\text{Contraste} = \text{promedio}(\text{bordes}) - \text{promedio}(\text{fondo})$ . Como el fondo en “line art” suele ser

casi blanco (cerca de 255) y los bordes son oscuros (valores bajos), entonces: bordes (bajo) – fondo (alto) = negativo. Mientras más negativo, mayor diferencia entre bordes y fondo (mejor legibilidad).

- Cerca de -20: bordes poco separados del fondo (menos legible).
- Cerca de -45 o -50: bordes muy separados (más legible, más “tinta negra sobre papel blanco”).

Se observa en la gráfica

- En las primeras imágenes, el contraste está alrededor de -22 a -40 (variable).
- En la segunda mitad aparecen muchos valores alrededor de -45 a -50, lo cual indica bordes más oscuros o fondo más limpio, y por tanto mejor “lectura” del retrato.

Se concluye:

“El contraste borde–fondo aumenta (en magnitud) en un conjunto importante de muestras, indicando una separación clara entre trazos y fondo, lo que favorece la legibilidad perceptual del retrato hablado.”

#### **4.4.2 Justificación del método y parámetros**

El sistema emplea un filtro tipo Dodge & Burn digital (técnica derivada del revelado fotográfico analógico y hoy usada para simular bocetos a lápiz). Este tipo de transformación se caracteriza por generar líneas suaves de baja frecuencia de trazo, por lo que fue necesario ajustar el detector de bordes para capturar detalles sutiles propios del estilo “retrato hablado artístico”.

En la siguiente tabla 21. Ajuste de parámetros para detección de trazos finos, se muestran los parámetros utilizados se basan en reportes previos de detección de trazos finos en ilustración digital y análisis de edge-sketching:

Parámetro	Valor	Justificación técnica
$\sigma$ (suavizado gaussiano)	0.3	Mantiene sensibilidad a ruido fino sin eliminar micro-detalles (Parker, 2010)
low_threshold	0.02	Permite capturar bordes de bajo contraste, propio del trazo suave del efecto dodge & burn
high_threshold	0.10	Umbral permisivo que acepta líneas tenues sin sobredetectar ruido

Tabla 22. Ajuste de parámetros para detección de trazos finos

La consistencia de las métricas confirma que:

- Las imágenes mantienen la proporción esperada de trazo para retratos tipo sketch (~2–8% densidad, según literatura de edge-sparseness en bocetos).
- La energía y el contraste aumentan proporcionalmente con la complejidad del cabello y facciones (coherente con la teoría de gradiente acumulado).
- No se presentan fallos de sobrebinarización ni pérdida anatómica en ojos, cejas, boca y contorno facial, lo que valida la adecuación del pipeline.



## CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

Se logro el objetivo general que es el desarrollo de un método de reconstrucción de retratos hablados basado en el principio de superposición y el uso de la Transformada de Fourier como herramienta, demostrando que la combinación entre fundamentos de sistemas lineales y técnicas de procesamiento digital de imágenes permite generar representaciones más coherentes, anatómicamente precisas y reproducibles. Este enfoque reduce la dependencia del dibujante forense y la subjetividad inherente a los métodos manuales, aportando una solución sistemática para aplicaciones en seguridad y criminalística.

1. **Aplicación del principio de superposición:** Se validó como modelo matemático adecuado para representar el rostro humano como la suma lineal de sus componentes morfológicos. La utilización de puntos cefalométricos permitió alinear y escalar correctamente los rasgos, garantizando continuidad entre regiones faciales y evitando deformaciones. La fase experimental confirmó que este procedimiento mantiene las proporciones anatómicas y la simetría facial, fundamentales para la identificación visual.
2. **Uso de la Transformada de Fourier en la reconstrucción:** La Transformada de Fourier facilitó la unión de las partes faciales en el dominio frecuencial, preservando la información de bordes y mejorando

la integración tonal de las zonas de unión. La suma de los espectros de frecuencia reforzó la coherencia estructural y redujo artefactos visuales, demostrando que el enfoque frecuencial es una alternativa eficaz a los métodos exclusivamente espaciales para la reconstrucción facial automatizada.

3. **Base de datos y diversidad facial:** La creación y uso de una base de datos balanceada de 50 retratos (hombres y mujeres con variación de tipos de rostro y rasgos faciales) permitió evaluar la robustez del método. La diversidad de combinaciones probadas aseguró que el algoritmo respondiera correctamente ante distintos morfotipos y características de iluminación, cumpliendo con criterios de generalización y realismo anatómico. Considerando cinco morfologías faciales principales y la combinación independiente de siete rasgos anatómicos (cabello, cejas, ojos, nariz, boca, mentón y orejas), el espacio combinatorio del sistema alcanza  $=5 \times 2 \times 56 = 156,250$  configuraciones faciales posibles. Esta diversidad permite una representación amplia de variaciones morfológicas y respalda la escalabilidad del método propuesto frente a sistemas tradicionales basados en catálogos limitados de rasgos.
4. **Filtrado espacial como etapa de realce visual:** Se probaron diferentes tipos de filtros hasta encontrar el más efectivo para nuestro enfoque. El uso del filtro Dodge & Burn fue determinante para lograr trazos suaves y tonalidades graduales, manteniendo la estética tipo boceto propia del retrato hablado. Este método de realce, aplicado antes de la superposición frecuencial, permitió aumentar la legibilidad del contorno sin perder la naturalidad del trazo.

5. **Validación mediante métricas objetivas:** Las métricas aplicadas — Energía de Bordes, Densidad de Trazos y Contraste— mostraron resultados consistentes con la naturaleza de un retrato hablado.

- La Energía de Bordes alcanzó valores elevados, indicando bordes bien definidos y continuidad en las líneas principales.
- La Densidad de Trazos se mantuvo en un promedio de 1.9 %, reflejando una cobertura adecuada de contornos sin saturar el área facial, dentro del rango óptimo reportado (15–30 %) para bocetos artísticos y forenses.
- El Contraste promedio ( $\approx 35$ ) confirmó una diferenciación efectiva entre zonas sombreadas y fondo, validando la calidad del filtrado aplicado.
- Las tres métricas resultaron coherentes con lo esperado en imágenes tipo “retrato hablado”, respaldando la validez del método propuesto.
- Los parámetros experimentales seleccionados ( $\sigma = 0.3$ , *low\_threshold* = 0.02, *high\_threshold* = 0.10) optimizaron la detección de microbordes sin introducir artefactos ni ruido perceptual.
- Se observaron correlaciones esperadas: retratos con cabello rizado o facciones más pronunciadas presentaron mayores valores de energía y contraste, lo cual coincide con estudios sobre densidad estructural en bocetos técnicos (González & Woods, *Digital Image Processing*, 2018).
- Finalmente, la distribución métrica del conjunto de  $N = 50$  retratos evidenciaron estabilidad del modelo y consistencia en el

procesamiento, confirmando la reproducibilidad del método bajo condiciones controladas.

6. **Desempeño del algoritmo y consistencia visual:** Las pruebas experimentales confirmaron que el algoritmo mantiene un equilibrio entre nitidez, continuidad y contraste, incluso en rostros con alta complejidad (cabello rizado, cejas gruesas o facciones marcadas). La representación final conserva la identidad morfológica del individuo, cumpliendo con los criterios de legibilidad y coherencia perceptual requeridos en aplicaciones forenses.
7. **Comparación con métodos tradicionales:** En comparación con técnicas manuales y enfoques basados en heurísticas o algoritmos evolutivos, el método propuesto mostró una reconstrucción más controlada y una estructura morfológica más consistente. Su carácter lineal y matemáticamente interpretable facilita su adaptación a sistemas automatizados y reduce la variabilidad asociada al juicio subjetivo del dibujante humano.
8. **Impacto y proyección del método propuesto:** Este método representa un avance significativo en el campo de la criminalística visual al combinar formalismo matemático, procesamiento digital y diseño gráfico computacional. Su potencial de integración en plataformas digitales permitirá a las instituciones de seguridad generar retratos hablados más precisos y consistentes, con menor tiempo de elaboración y mayor fidelidad visual frente a la descripción verbal de testigos.

## 5.2 Recomendaciones

1. **Validación con especialistas forenses:** Dado que el proyecto se centró en la fase de desarrollo y validación técnica, se recomienda realizar en etapas posteriores una validación perceptual y operativa con expertos en criminalística y dibujo forense. La retroalimentación de peritos permitirá ajustar la representación de los rasgos, mejorar la interpretación visual del boceto y validar su utilidad práctica en investigaciones reales.
2. **Ampliación de la base de datos facial:** Se sugiere incrementar el número y la diversidad de imágenes utilizadas para el entrenamiento y prueba del sistema, incorporando variaciones de edad, etnia, iluminación y expresión facial. Esto permitirá mejorar la generalización del modelo y la cobertura de rasgos representativos de la población mexicana.
3. **Optimización del módulo de preprocesamiento:** Aunque el sistema logró coherencia anatómica, puede fortalecerse la etapa de normalización de color de piel y textura mediante técnicas de igualación de histograma o aprendizaje automático. Esto asegurará una integración más homogénea de las partes faciales antes de la superposición frecuencial.
4. **Automatización de índices cefalométricos:** Actualmente, los puntos de referencia anatómicos son definidos manualmente. En futuras versiones, estos pueden obtenerse automáticamente mediante redes de detección de landmarks faciales, lo que reduciría el tiempo de procesamiento y mejoraría la precisión del alineamiento geométrico entre las partes.

5. **Optimización de la interfaz de usuario:** Se propone mejorar la interfaz gráfica para hacerla más intuitiva para llevarlo al usuario desde una aplicación. Esto facilitará su uso por personal no técnico en entornos policiales o judiciales.
6. **Extensión a estudios perceptuales y sociales:** Finalmente, se recomienda evaluar la eficacia del retrato hablado digital desde la percepción humana, aplicando pruebas con voluntarios y comparando el grado de semejanza percibido frente a rostros reales o simulados. Esta etapa complementará la validación técnica con una validación cognitiva y práctica, fortaleciendo el valor aplicado del sistema.

## REFERENCIAS

- [1] A. Kammoun, R. Slama, H. Tabia, T. Ouni, and M. Abid, “Generative Adversarial Networks for Face Generation: A Survey,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 55, pp. 1–37, Oct. 2022, doi: 10.1145/3527850.
- [2] B. Zahradníková, S. Duchovičová, and P. Schreiber, “Facial composite systems: review,” *Artif. Intell. Rev.*, vol. 49, pp. 1–22, Oct. 2018, doi: 10.1007/s10462-016-9519-1.
- [3] R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Londres, Reino Unido: Springer-Verlag, 2010.
- [4] K. Scott, C. Tredoux, and A. Nortje, “Evaluating the utility of facial identification information: Accuracy versus precision,” *S. Afr. J. Sci.*, vol. 119, Oct. 2023, doi: 10.17159/sajs.2023/12067.
- [5] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli, “Image quality assessment: From error visibility to structural similarity,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13, no. 4, pp. 600–612, 2004, doi: 10.1109/TIP.2003.819861.
- [6] C. Wilkinson, “A review of forensic art,” *Research and Reports in Forensic Medical Science*, 2015, doi: 10.2147/rrfms.s60767.
- [7] F. Fuentes-Hurtado, J. A. Diego-Mas, V. Naranjo, and M. Alcañiz, “Automatic classification of human facial features based on their appearance,” *PLoS One*, vol. 14, no. 1, pp. 1–20, Apr. 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0211314.
- [8] C. Serrano, M. Villanueva, J. Luy, and C. Link, “La cara del mexicano. Sistema de retrato hablado asistido por computadora,” Mexico, DF, 2002. Accessed: Oct. 04, 2025. [Online]. Available: <https://forost.org/seminar/CARAMEX.pdf>

- [9] C. Frowd, V. Bruce, and P. J. B. Hancock, "Evolving facial composite systems," *Forensic Update*, vol. 1, no. 98, 2009, doi: 10.53841/bpsfu.2009.1.98.25.
- [10] V. Ashok and D. Ganapathy, "A geometrical method to classify face forms," *J. Oral Biol. Craniofac. Res.*, vol. 9, no. 3, 2019, doi: 10.1016/j.jobcr.2019.06.001.
- [11] Ruben Martos Fernandez, "Identificacion craneofacial\_ cuantificacion y comparacion morfologica ," Universidad de Granada, Granada, 2021.
- [12] G. Zhao and M. Pietikainen, "Dynamic Texture Recognition Using Local Binary Patterns with an Application to Facial Expressions," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 29, no. 6, pp. 915–928, 2007, doi: 10.1109/TPAMI.2007.1110.
- [13] R.C. González and R.E. Woods, *Digital Image Processing*, 4th ed. Upper Saddle River, New Jersey, United States: Pearson Education, 2018.
- [14] INISEG, "El Arte Forense como disciplina auxiliar en la identificación humana," INISEG. Accessed: Apr. 21, 2025. [Online]. Available: <https://www.iniseg.es/comunicacion-iniseg/blog/2022/12/14/arte-forense-identificacion-humana-criminalistica/>
- [15] Y. Gao and M. K. H. Leung, "Face recognition using line edge map," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 24, no. 6, pp. 764–779, 2002, doi: 10.1109/TPAMI.2002.1008383.
- [16] J. Ramos, "Morphing y patrones para recreación de rostros en dos dimensiones," Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, 2011.
- [17] R. N. Bracewell, *The Fourier Transform and Its Applications*, 3rd ed. Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill Higher Education, 2000.
- [18] D. Zhang and G. Lu, "A comparative Study of Fourier Descriptors for Shape Representation and Retrieval," *Patter Recognition, Elsevier*, vol. 1, pp. 1–19, 2002, doi: 10.1016/S0031-3203(03)00284-2.

- [19] M. Turk and A. Pentland, "Eigenfaces for Recognition," *J. Cogn. Neurosci.*, vol. 3, no. 1, pp. 71–86, Jan. 1991, doi: 10.1162/jocn.1991.3.1.71.
- [20] C. Liu and H. Wechsler, "Gabor feature based classification using the enhanced fisher linear discriminant model for face recognition," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 11, no. 4, pp. 467–476, 2002, doi: 10.1109/TIP.2002.999679.
- [21] Alejandro De la Garza, "México: inseguridad, delitos, impunidad... 'El alacrán insiste entonces, ¿por qué los delitos no se denuncian?'"
- [22] Jessica Contreras, "Los estados con mas y menos delitos en México en 2025," Sep. 19, 2025. Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.liderempresarial.com/los-estados-con-mas-y-menos-delitos-en-mexico-en-2025>
- [23] "Cifra negra: En México más del 93% de delitos no 'existieron', según reporte el Inegi | Radio Fórmula." Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: [https://www.reddit.com/r/POLACA/comments/x9aysd/cifra\\_negra\\_en\\_m%C3%A9xico\\_m%C3%A1s\\_del\\_93\\_de\\_delitos\\_no](https://www.reddit.com/r/POLACA/comments/x9aysd/cifra_negra_en_m%C3%A9xico_m%C3%A1s_del_93_de_delitos_no)
- [24] Ana Karen García, "Percepción sobre inseguridad en México: El 58.6% de la población urbana considera peligroso vivir en su ciudad," *El Economista*, México, Oct. 21, 2024.
- [25] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, vol. 3. Upper Saddle River, Nueva Jersey, EE. UU.: Prentice Hall, 2010.
- [26] W. K. Pratt, *Digital Image Processing: PIKS Scientific Inside*, 4th ed. Hoboken, New Jersey, United States: Wiley-Interscience, 2007.
- [27] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, and S. H. Nawab, *Señales y Sistemas*, 2da ed. Ciudad de México: Pearson Educación / Prentice Hall Hispanoamericana, 1997. [Online]. Available: [www.elsolucionario.net](http://www.elsolucionario.net)
- [28] A. K. Jain, *Fundamentals of Digital Image Processing*. Englewood Cliffs, New Jersey, United States: Prentice-Hall, 1989.

- [29] F. J. Harris, "On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform," *Proceedings of the IEEE*, vol. 66, no. 1, pp. 51–83, 1978, doi: 10.1109/PROC.1978.10837.
- [30] D. Marr and E. Hildreth, "Theory of edge detection," *Proceedings of the Royal Society of London - Biological Sciences*, vol. 207, no. 1167, 1980, doi: 10.1098/rspb.1980.0020.
- [31] J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. PAMI-8, no. 6, 1986, doi: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
- [32] T. S. Huang, G. J. Yang, and G. Y. Tang, "A Fast Two-Dimensional Median Filtering Algorithm," *IEEE Trans. Acoust.*, vol. 27, no. 1, pp. 13–18, 1979, doi: 10.1109/TASSP.1979.1163188.
- [33] H. Winnemöller, J. E. Kyprianidis, and S.C. Olsen, "XDoG: An eXtended difference-of-Gaussians compendium including advanced image stylization," *Comput. Graph.*, vol. 36, no. 6, pp. 740–753, 2012, doi: 10.1016/j.cag.2012.03.004.
- [34] J. G. Daugman, "Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency, and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 2, no. 7, 1985, doi: 10.1364/josaa.2.001160.
- [35] J. S. Lim, *Two-dimensional signal and image processing*, vol. 710. Englewood Cliffs, Nueva Jersey: Prentice Hall, 1990.
- [36] "2D Fourier transform of Sobel kernel." Accessed: Sep. 28, 2025. [Online]. Available: <https://dsp.stackexchange.com/questions/46072/2d-fourier-transform-of-sobel-kernel?>
- [37] B. Zitová and J. Flusser, "Image registration methods: A survey," *Image Vis. Comput.*, vol. 21, no. 11, pp. 977–1000, 2003, doi: 10.1016/S0262-8856(03)00137-9.
- [38] T. F. Cootes, G. J. Edwards, and C. J. Taylor, "Active appearance models," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 23, no. 6, pp. 681–685, 2001, doi: 10.1109/34.927467.

- [39] RM George, *Facial Geometry: graphic facial analysis for forense artists*. Boca Raton, Florida, United States: CRC Press, 2007.
- [40] Gupta, "Human Faces Datase." Accessed: May 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.kaggle.com/datasets/ashwingupta3012/human-faces>
- [41] C. Serrano-Sánchez, *Un sistema automatizado de identificación de rasgos faciales (retrato hablado) para la población mexicana*. Mexico: IIBIUNAM, 2013. Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: [http://ru.iibi.unam.mx/jspui/handle/IIBI\\_UNAM/CL484](http://ru.iibi.unam.mx/jspui/handle/IIBI_UNAM/CL484)
- [42] Z.-K. Huang and D.-H. Liu, "Segmentation of Color Image Using EM algorithm in HSV Color Space," in *2007 International Conference on Information Acquisition*, 2007, pp. 316–319. doi: 10.1109/ICIA.2007.4295749.

# APÉNDICES

## Apéndice I

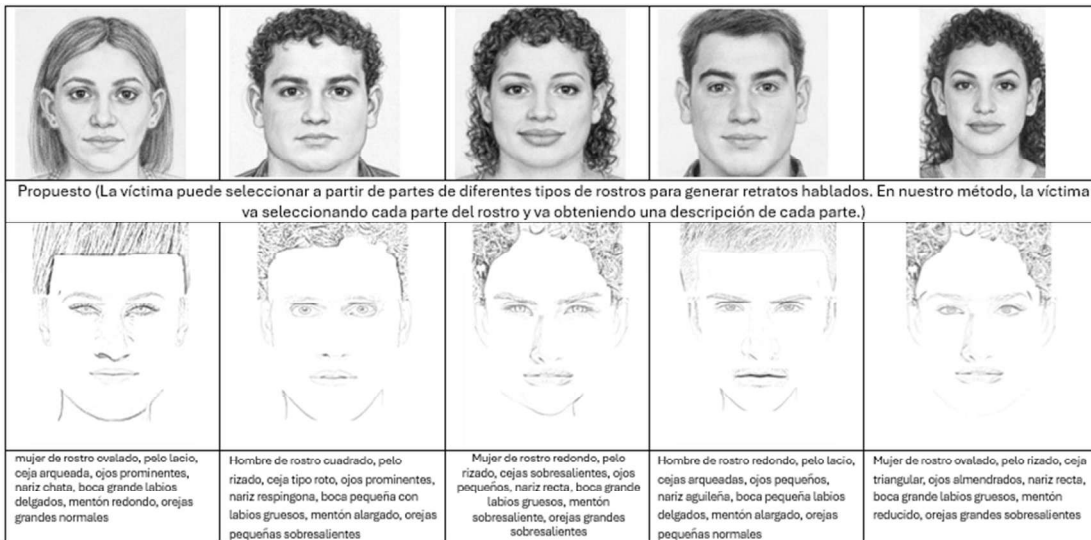
### Encuesta y resultados de la Comparativa de métodos actuales vs. propuesta para retrato hablado (métodos tradicionales de retrato hablado, enfoques digitales modernos y la metodología propuesta)

Instrucciones: La presente encuesta tiene como finalidad evaluar de manera perceptual la calidad de diferentes métodos de generación de retratos hablados digitales utilizadas en contextos forenses. Su opinión ayudará a comparar el desempeño visual y funcional de cada técnica.

#### Indicaciones generales

1. Observe cuidadosamente cada imagen presentada y la explicación de cómo se crean los rostros con cada método.
2. Para cada retrato, califique los siguientes aspectos de acuerdo con su percepción en la tabla que se proporciona al final del documento.
3. Utilice la siguiente escala de valoración:  
**Escala de evaluación 1 = Muy bajo / Deficiente, 2 = Bajo, 3 = Medio / Aceptable, 4 = Alto, 5 = Muy alto / Excelente**
4. No existen respuestas correctas o incorrectas; se busca únicamente su apreciación personal.
5. Evalúe cada imagen de forma independiente, sin compararla con las anteriores.

<p>Artesanal (Un experto en dibujo forense, crea un rostro a partir de la descripción dada por una víctima. El retrato será mejor de acuerdo con la experiencia del dibujante. El entendimiento entre el dibujante y la víctima puede haber sesgo o falta de información.)</p>				
				
<p>Morfing (Un experto en criminalística, utiliza un sistema computacional que construye un retrato a partir de la descripción dada por una víctima. Al igual que el método artesanal, este método depende de la experiencia del experto. El entendimiento entre el experto y la víctima puede haber sesgo o falta de información. La víctima es acompañada por el experto.)</p>				
				
<p>IA (Cualquier persona puede darle a un modelo de IA la descripción de una persona para generar el retrato hablado. El problema, es que la IA está entrenada con rostros de personas famosas y los rasgos pueden ser parecidos a personas famosas.)</p>				



Escala de evaluación 1 = Muy bajo / Deficiente, 2 = Bajo, 3 = Medio / Aceptable, 4 = Alto, 5 = Muy alto / Excelente				
	Dibujo artesanal	Morfing	IA	Propuesto
Realismo anatómico				
Reproducibilidad				
Estética funcional				
Dependencia del perito				
Riesgo de sesgo				

**Realismo anatómico** → Qué tan natural y parecido se ve el rostro de una persona real  
**Reproducibilidad** → Qué tan consistente es el método; si al repetirlo produce resultados similares y no muy diferentes  
**Estética funcional** → Qué tan claros y definidos se ven los rasgos (ojos, nariz, boca), y si el retrato facilita reconocer a la persona.  
**Dependencia del perito** → Qué tanto el resultado depende de la habilidad o experiencia de quien lo dibuja  
**Riesgo de sesgo** → ¿Qué tan probable es que el método favorezca o perjudique a ciertos grupos de personas (por ejemplo edad, género, tono de piel o rasgos faciales) o que produzca resultados poco justos o representativos? 🟡 1 = Muy bajo sesgo (justo y neutral) 🟠 5 = Muy alto sesgo (puede generar resultados injustos o poco representativos)

		Dibujo artesanal por perito																																																	Prom.					
Realismo anatómico		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	4.4				
Reproducibilidad		2	2	2	2	3	3	2	2	3	3	2	2	2	3	2	4	2	2	3	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	3	4	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2.2
Estética funcional		5	5	4	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	4.4		
Dependencia del perito		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5.5		
Riesgo de sesgo		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3.3			

		Morfing / bases de datos																																																	Prom.					
Realismo anatómico		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	3.3				
Reproducibilidad		4	3	3	3	4	4	2	4	4	4	4	3	3	4	4	4	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3.3	
Estética funcional		3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3.3	
Dependencia del perito		2	2	2	3	3	3	2	2	3	3	2	3	3	3	4	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2.2
Riesgo de sesgo		3	1	2	3	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3.3	

		IA																																																	Prom.					
Realismo anatómico		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	5.5				
Reproducibilidad		5	4	4	3	4	4	5	4	4	4	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4.4
Estética funcional		4	4	5	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4.4
Dependencia del perito		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.1	
Riesgo de sesgo		2	2	2	1	2	2	2	3	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2.2

		Propuesta																																																	Prom.						
Realismo anatómico		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	4.4					
Reproducibilidad		4	4	4	4	3	4	4	3	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4.4
Estética funcional		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5.5
Dependencia del perito		2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2.2
Riesgo de sesgo		4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4.4

## Apéndice II

### Proceso para selección interactiva de puntos cefalométricos en la plantilla del rostro y en cada componente facial

import numpy as np

import math

```

def seleccionar_puntos(nombre_ventana, imagen, diccionario_puntos):

    def click(event, x, y, flags, param):

        if event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN:

            etiqueta = input(f"{nombre_ventana} - Etiqueta para ({x},{y}): ")

            diccionario_puntos[etiqueta] = (x, y)

            cv2.circle(imagen, (x, y), 5, (0, 255, 0), -1)

            cv2.imshow(nombre_ventana, imagen)

    cv2.imshow(nombre_ventana, imagen)

    cv2.setMouseCallback(nombre_ventana, click)

    print(

        f"Selecciona puntos con etiquetas en {nombre_ventana}. Presiona ESC para terminar."

    )

    while True:

        if cv2.waitKey(1) == 27:

            break

    cv2.destroyAllWindows(nombre_ventana)

def distancia(p1, p2):

    return np.linalg.norm(np.array(p1) - np.array(p2))

# Cargar imágenes

rostro = cv2.imread("images/plantillas/tp003_pc.fw.png")

componente = cv2.imread("images/orejas/hor001.jpg")

rostro_copy = rostro.copy()

```

```

componente_copy = componente.copy()

# Dicionarios de puntos
puntos_rostro = {}
puntos_componente = {}

# Seleccionar puntos en ambas imágenes
seleccionar_puntos("Rostro", rostro_copy, puntos_rostro)
seleccionar_puntos("Componente", componente_copy, puntos_componente)

# Encontrar etiquetas comunes
etiquetas = list(set(puntos_rostro.keys()) & set(puntos_componente.keys()))
if len(etiquetas) < 2:
    raise ValueError(
        "Se requieren al menos 2 puntos coincidentes con la misma etiqueta en ambas
        imágenes."
    )

# Calcular escalado promedio basado en distancias entre pares de puntos
dist_rostro = []
dist_componente = []
for i in range(len(etiquetas)):
    for j in range(i + 1, len(etiquetas)):
        pi_r = puntos_rostro[etiquetas[i]]
        pj_r = puntos_rostro[etiquetas[j]]
        pi_c = puntos_componente[etiquetas[i]]

```

```

    pj_c = puntos_componente[etiquetas[j]]
    dist_rostro.append(distancia(pi_r, pj_r))
    dist_componente.append(distancia(pi_c, pj_c))

factor_escalado = np.mean(np.array(dist_rostro) / np.array(dist_componente))
print(f"Factor de escala medio: {factor_escalado:.2f}")

# Redimensionar componente
componente_escalado = cv2.resize(
    componente, None, fx=factor_escalado, fy=factor_escalado, interpolation=cv2.INTER_LINEAR
)

# Calcular traslaciones por cada punto, luego promediar
traslaciones = []
for etiqueta in etiquetas:
    px_r = np.array(puntos_rostro[etiqueta])
    px_c = np.array(puntos_componente[etiqueta]) * factor_escalado
    t = px_r - px_c
    traslaciones.append(t)

traslacion_media = np.mean(traslaciones, axis=0).astype(int)
print(f"Traslación media: {traslacion_media}")

# Aplicar la transformación
output = rostro.copy()
h, w = rostro.shape[:2]
comp_h, comp_w = componente_escalado.shape[:2]

```

```

for y in range(comp_h):
    for x in range(comp_w):
        xi = x + traslacion_media[0]
        yi = y + traslacion_media[1]
        if 0 <= xi < w and 0 <= yi < h:
            pixel = componente_escalado[y, x]
            if not np.all(pixel == 0): # evitar fondo negro
                output[yi, xi] = pixel

cv2.imshow("Resultado", output)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

```

### Apéndice III

#### Script Flujo general de aplicación de filtros espaciales

```

import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Cargar la imagen de la boca
ruta_imagen = 'imagenes/boca/hb001.jpg' # Ajusta la ruta según tu imagen
imagen_boca = cv2.imread(ruta_imagen)

if imagen_boca is None:
    print(f"✗ No se pudo cargar la imagen desde {ruta_imagen}")
    print("Por favor, verifica la ruta de la imagen")
else:
    # Convertir a escala de grises
    imagen_gris = cv2.cvtColor(imagen_boca, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    print(f"✓ Imagen cargada: {imagen_gris.shape}")

```

```

# Mostrar imagen original
plt.figure(figsize=(8, 4))
plt.imshow(cv2.cvtColor(imagen_boca, cv2.COLOR_BGR2RGB))
plt.title('Imagen original')
plt.axis('off')
plt.show()

# Método 1: Boceto usando detección de bordes Canny
def boceto_canny(imagen_gris):
    """Boceto simple usando detección de bordes Canny"""
    # Aplicar desenfoque gaussiano para reducir ruido
    imagen_suavizada = cv2.GaussianBlur(imagen_gris, (5, 5), 0)

    # Detectar bordes
    bordes = cv2.Canny(imagen_suavizada, 50, 150)

    # Invertir (fondo blanco, líneas negras)
    boceto = cv2.bitwise_not(bordes)

    return boceto

# Aplicar método 1
boceto_1 = boceto_canny(imagen_gris)

plt.figure(figsize=(8, 4))
plt.imshow(boceto_1, cmap='gray')
plt.title('Método 1: Boceto con Canny')
plt.axis('off')
plt.show()

# Método 2: Boceto con Dodge y Burn (más realista)
def boceto_dodge_burn(imagen_gris):
    """
    Efecto de boceto usando técnicas de dodge y burn
    Este método produce un resultado más artístico y realista
    """
    # 1. Invertir la imagen
    imagen_invertida = cv2.bitwise_not(imagen_gris)

    # 2. Aplicar desenfoque gaussiano a la imagen invertida
    imagen_blur = cv2.GaussianBlur(imagen_invertida, (21, 21), 0)

    # 3. Aplicar la operación de "dodge" (división de color)
    def dodge(front, back):
        """Dodge blend mode"""
        result = cv2.divide(front, 255 - back, scale=256)
        return result

```

```

    boceto = dodge(imagen_gris, imagen_blur)

    return boceto

# Aplicar método 2
boceto_2 = boceto_dodge_burn(imagen_gris)

plt.figure(figsize=(8, 4))
plt.imshow(boceto_2, cmap='gray')
plt.title('Método 2: Boceto Dodge & Burn (más realista)')
plt.axis('off')
plt.show()

# Método 3: Boceto con XDoG (eXtended Difference of Gaussians)
def boceto_xdog(imagen_gris, sigma=0.5, k=200, epsilon=0.01):
    """
    Método XDoG para crear bocetos artísticos
    Produce líneas más definidas y estilo más profesional
    """

    # Aplicar dos desenfoque gaussiano con diferentes sigma
    g1 = cv2.GaussianBlur(imagen_gris, (0, 0), sigma)
    g2 = cv2.GaussianBlur(imagen_gris, (0, 0), sigma * 1.6)

    # Diferencia de Gaussianas
    dog = g1 - g2

    # Aplicar función de umbral suave
    dog = dog.astype(np.float32) / 255.0

    # XDoG: realzar bordes
    e = 1.0 + np.tanh(k * (dog - epsilon))
    e = e / e.max()

    # Convertir a rango 0-255
    boceto = (e * 255).astype(np.uint8)

    # Invertir para fondo blanco
    boceto = cv2.bitwise_not(boceto)

    return boceto

# Aplicar método 3
boceto_3 = boceto_xdog(imagen_gris)

plt.figure(figsize=(8, 4))
plt.imshow(boceto_3, cmap='gray')
plt.title('Método 3: Boceto XDoG (estilo artístico)')
plt.axis('off')
plt.show()

```

```

# Método 4: Boceto con pencil sketch (lápiz)
def boceto_pencil(imagen):
    """
    Efecto de boceto a lápiz usando funciones de OpenCV
    """
    # Convertir a escala de grises si es necesario
    if len(imagen.shape) == 3:
        img_gris = cv2.cvtColor(imagen, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    else:
        img_gris = imagen

    # Usar la función pencilSketch de OpenCV
    boceto_gris, boceto_color = cv2.pencilSketch(
        imagen,
        sigma_s=60, # Rango espacial
        sigma_r=0.07, # Rango de color
        shade_factor=0.05 # Factor de sombreado
    )

    return boceto_gris

# Aplicar método 4
boceto_4 = boceto_pencil(imagen_boca)

plt.figure(figsize=(8, 4))
plt.imshow(boceto_4, cmap='gray')
plt.title('Método 4: Boceto a lápiz (OpenCV pencilSketch)')
plt.axis('off')
plt.show()

# Comparación de todos los métodos
fig, axs = plt.subplots(2, 3, figsize=(15, 10))

# Imagen original
axs[0, 0].imshow(cv2.cvtColor(imagen_boca, cv2.COLOR_BGR2RGB))
axs[0, 0].set_title('Original', fontsize=14, fontweight='bold')
axs[0, 0].axis('off')

# Escala de grises
axs[0, 1].imshow(imagen_gris, cmap='gray')
axs[0, 1].set_title('Escala de grises', fontsize=14)
axs[0, 1].axis('off')

# Método 1: Canny
axs[0, 2].imshow(boceto_1, cmap='gray')
axs[0, 2].set_title('Método 1: Canny\n(bordes simples)', fontsize=12)
axs[0, 2].axis('off')

# Método 2: Dodge & Burn

```

```

axs[1, 0].imshow(boceto_2, cmap='gray')
axs[1, 0].set_title('Método 2: Dodge & Burn\n(más realista)', fontsize=12)
axs[1, 0].axis('off')

# Método 3: XDoG
axs[1, 1].imshow(boceto_3, cmap='gray')
axs[1, 1].set_title('Método 3: XDoG\n(estilo artístico)', fontsize=12)
axs[1, 1].axis('off')

# Método 4: Pencil Sketch
axs[1, 2].imshow(boceto_4, cmap='gray')
axs[1, 2].set_title('Método 4: Pencil Sketch\n(lápiz)', fontsize=12)
axs[1, 2].axis('off')

plt.tight_layout()
plt.show()

print("\n 📄 Resumen de métodos:")
print("1. Canny: Bordes nítidos y limpios")
print("2. Dodge & Burn: Efecto suave y gradual (mejor para retratos)")
print("3. XDoG: Líneas definidas, estilo ilustración")
print("4. Pencil Sketch: Textura de lápiz, más natural")

```

## Apéndice IV

### Script generación de rostros

```

def suma_imagenes_dominio_frecuencial(parts_data: list):
    """
    Suma imágenes de partes faciales en el dominio frecuencial.

    Args:
        parts_data: Lista de diccionarios con estructura:
            [{'imagen': 'path/to/image.png', 'indices': {...}, ...}, ...]
            El primer elemento debe ser la plantilla base.

    Returns:
        np.ndarray: Imagen resultante normalizada (escala de grises)
    """
    if not parts_data or len(parts_data) < 1:
        raise ValueError("Se requiere al menos una imagen (plantilla base)")

```

```

# Cargar la plantilla base (primer elemento)
plantilla = {
    "imagen": cv.imread(parts_data[0]["imagen"], cv.IMREAD_GRAYSCALE),
    "indices": parts_data[0].get("indices", {}),
}

# Cargar las partes faciales (resto de elementos)
imgs_list = [
    {
        "imagen": filtro_dodge_burn(
            cv.imread(part_data["imagen"], cv.IMREAD_GRAYSCALE)
        ),
        "parte": part_data.get("parte", ""),
        "indices": part_data.get("indices", {}),
    }
    for part_data in parts_data[1:]
]

# Inicializar la suma en el dominio frecuencial
suma_frecuencial = None

for i in range(len(imgs_list)):
    img = colocar_parte_en_plantilla(
        plantilla["imagen"],
        aplica_mascara_cuadrada_suavizada(imgs_list[i]["imagen"], padding=5),
        plantilla["indices"].get(imgs_list[i]["parte"], {}),
        imgs_list[i]["indices"],
    )
    # img = filtro_dodge_burn(img)
    # Transformada de Fourier 2D
    f = np.fft.fft2(img)
    fshift = np.fft.fftshift(f)

    if suma_frecuencial is None:
        suma_frecuencial = fshift
    else:
        suma_frecuencial += fshift

# Transformada inversa para regresar al dominio espacial
f_ishift = np.fft.ifftshift(suma_frecuencial)
img_suma = np.fft.ifft2(f_ishift)
img_suma = np.abs(img_suma)

# Normalizar la imagen resultante a 0-255
img_suma_norm = normalizar_grises(img_suma)

return img_suma_norm

def colocar_parte_en_plantilla(
    plantilla, parte_rostro, indices_plantilla, indices_parte
):
    """
    Coloca una parte del rostro en su posición correcta sobre una plantilla base.

```

Utiliza el algoritmo de escalado y traslación basado en puntos de referencia comunes entre la plantilla y la parte del rostro.

Args:

plantilla (np.ndarray): Imagen de la plantilla base (fondo blanco)  
parte\_rostro (np.ndarray): Imagen de la parte del rostro a colocar  
indices\_plantilla (dict): Diccionario con puntos de referencia de la plantilla  
Estructura: {"nombre\_punto": {"x": int, "y": int}, ...}  
indices\_parte (dict): Diccionario con puntos de referencia de la parte  
Debe tener las mismas claves que indices\_plantilla

Returns:

np.ndarray: Imagen resultante con las dimensiones de la plantilla y la parte colocada

Ejemplo de uso:

```
indices_plantilla = {
    "sad": {"x": 411, "y": 206},
    "zyd": {"x": 395, "y": 277},
    "sbad": {"x": 391, "y": 341}
}
indices_parte = {
    "sad": {"x": 46, "y": 8},
    "zyd": {"x": 13, "y": 85},
    "sbad": {"x": 9, "y": 139}
}
resultado = colocar_parte_en_plantilla(plantilla, oreja, indices_plantilla, indices_parte)
"""
# Crear copia de la plantilla para no modificar el original
output = np.ones(plantilla.shape, dtype=plantilla.dtype) * 255

# Encontrar etiquetas comunes entre plantilla y parte
etiquetas_comunes = list(set(indices_plantilla.keys()) & set(indices_parte.keys()))

if len(etiquetas_comunes) < 2:
    raise ValueError(
        f"Se requieren al menos 2 puntos coincidentes. "
        f"Encontrados: {len(etiquetas_comunes)} ({etiquetas_comunes})"
    )

# Función auxiliar para calcular distancia euclidiana
def distancia(p1, p2):
    return np.linalg.norm(np.array(p1) - np.array(p2))

# Convertir diccionarios de índices a tuplas (x, y)
puntos_plantilla = {k: (v["x"], v["y"]) for k, v in indices_plantilla.items()}
puntos_parte = {k: (v["x"], v["y"]) for k, v in indices_parte.items()}

# Calcular factor de escala promedio basado en distancias entre pares de puntos
dist_plantilla = []
dist_parte = []
```

```

for i in range(len(etiquetas_comunes)):
    for j in range(i + 1, len(etiquetas_comunes)):
        etiq_i = etiquetas_comunes[i]
        etiq_j = etiquetas_comunes[j]

        # Distancias en plantilla
        pi_plantilla = puntos_plantilla[etiq_i]
        pj_plantilla = puntos_plantilla[etiq_j]
        dist_plantilla.append(distancia(pi_plantilla, pj_plantilla))

        # Distancias en parte
        pi_parte = puntos_parte[etiq_i]
        pj_parte = puntos_parte[etiq_j]
        dist_parte.append(distancia(pi_parte, pj_parte))

# Calcular factor de escala medio
factor_escalado = np.mean(np.array(dist_plantilla) / np.array(dist_parte))

# Redimensionar la parte del rostro
parte_escalada = cv.resize(
    parte_rostro,
    None,
    fx=factor_escalado,
    fy=factor_escalado,
    interpolation=cv.INTER_LINEAR,
)

# Calcular traslación promedio para alinear los puntos
traslaciones = []
for etiqueta in etiquetas_comunes:
    px_plantilla = np.array(puntos_plantilla[etiqueta])
    px_parte = np.array(puntos_parte[etiqueta]) * factor_escalado
    traslacion = px_plantilla - px_parte
    traslaciones.append(traslacion)

traslacion_media = np.mean(traslaciones, axis=0).astype(int)

# Obtener dimensiones
h_plantilla, w_plantilla = plantilla.shape[:2]
h_parte, w_parte = parte_escalada.shape[:2]

# Aplicar la transformación: colocar la parte escalada en la plantilla
for y in range(h_parte):
    for x in range(w_parte):
        # Calcular posición en la plantilla
        xi = x + traslacion_media[0]
        yi = y + traslacion_media[1]

        # Verificar que esté dentro de los límites
        if 0 <= xi < w_plantilla and 0 <= yi < h_plantilla:
            pixel = parte_escalada[y, x]

```

```
# Solo copiar píxeles no blancos (evitar fondo blanco)
# Umbral de 250 para considerar "blanco"
if len(pixel.shape) == 0: # Escala de grises
    if pixel < 250:
        output[yi, xi] = pixel
    else: # Color
        if not np.all(pixel > 250):
            output[yi, xi] = pixel

return output
```

## Apéndice V

### Tablas de índices cefalométricos

INDICES																			
TP001		rectangular				HOMBRES													
pelo		hp001		PC	hp002		PC			PC			PC			PC			
22	206	3	281	sai	6	279	sai												
222	47	207	172	tr	206	118	tr												
411	204	417	281	sad	414	281	sad												
frente		hf001		PC	hf002		PC	hf003		PC			PC			PC			
69	161	24	160	fti	25	143	fti	21	125	fti									
222	47	188	26	tr	181	24	tr	181	22	tr									
366	162	327	160	ftd	318	140	ftd	315	125	ftd									
cejas		hc001		PC	hc002		PC	hc003		PC	hc004		PC	hc005		PC			
77	219	13	43	fzi	9	35	fzi	14	49	fzi	12	41	fzi	17	44	fzi			
221	222	182	48	tr	184	42	tr	181	40	tr	176	49	tr	182	44	tr			
363	217	353	41	fzd	353	39	fzd	349	49	fzd	349	36	fzd	349	45	fzd			
ojos		ho001		PC	ho002		PC	ho003		PC	ho004		PC	ho005		PC			
107	236	33	29	exi	40	30	exi	32	29	exi	23	30	exi	20	35	exi			
221	220	172	2	se	180	9	se	175	4	se	166	3	se	178	5	se			
344	235	315	29	exd	319	33	exd	324	33	exd	308	29	exd	324	39	exd			
nariz		hn001		PC	hn002		PC	hn003		PC	hn004		PC	hn005		PC			
176	367	13	155	aci	1	150	aci	2	152	aci	4	151	aci	2	147	aci			
221	259	66	45	se	70	36	se	68	27	se	73	41	se	65	31	se			
266	366	124	154	acd	135	149	acd	138	151	acd	134	151	acd	138	149	acd			
boca		hb001		PC	hb002		PC	hb003		PC	hb004		PC	hb005		PC	hb006		
163	418	13	27	chi	7	29	chi												
221	418	80	28	sto	82	30	sto												
276	418	147	29	chd	157	32	chd												
155	419							13	40	chi	7	26	chi						
222	417							87	32	sto	86	25	sto						
284	417							158	41	chd	159	28	chd						
146	418													11	29	chi	9	26	chi
221	418													92	30	sto	89	28	sto
292	417													171	26	chd	166	28	chd
menton		hm001		PC	hm002		PC	hm003		PC	hm004		PC	hm005		PC			
74	460	8	8	gni	13	7	gni	17	10	gni	12	12	gni	26	15	gni			
222	551	142	86	me	160	96	me	155	89	me	157	98	me	165	97	me			
372	456	287	4	gnd	288	5	gnd	285	11	gnd	286	9	gnd	291	15	gnd			
orejas		hor001		PC	hor002		PC	hor003		PC	hor004		PC	hor005		PC	hor006		
411	215	46	8	sad	46	5	sad												
394	277	13	85	zyd	18	81	zyd												
392	330	9	139	sbad	9	138	sbad												
411	206							47	9	sad	51	3	sad						
395	277							15	94	zyd	17	85	zyd						
391	341							7	144	sbad	9	146	sbad						
410	200													46	9	sad	51	6	sad
394	277													13	103	zyd	18	95	zyd
389	348													7	154	sbad	7	156	sbad



INDICES																		
TP002		Redondo				HOMBRES												
pelo		hp001		PC	hp002			PC	PC			PC			PC	PC		
21	207	2	274	sai	10	276	sai											
223	45	227	176	tr	230	112	tr											
419	204	415	275	sad	410	276	sad											
frente		hf001		PC	hf002		PC	hf003		PC	PC			PC	PC			
70	161	26	155	fti	22	142	fti	25	125	fti								
223	47	184	38	tr	183	38	tr	176	32	tr								
366	161	311	157	ftd	318	143	ftd	323	126	ftd								
cejas		hc001		PC	hc002		PC	hc003		PC	hc004		PC	hc005		PC	PC	
77	219	12	43	fzi	8	36	fzi	13	43	fzi	14	43	fzi	19	40	fzi		
221	221	188	48	tr	186	49	tr	180	42	tr	181	48	tr	185	46	tr		
363	216	357	38	fzd	354	37	fzd	353	42	fzd	347	41	fzd	344	43	fzd		
ojos		ho001		PC	ho002		PC	ho003		PC	ho004		PC	ho005		PC	PC	
107	236	35	25	exi	38	27	exi	25	32	exi	21	28	exi	18	32	exi		
221	220	172	4	se	176	5	se	176	7	se	164	5	se	171	6	se		
344	235	312	26	exd	317	32	exd	325	37	exd	307	28	exd	325	36	exd		
nariz		hn001		PC	hn002		PC	hn003		PC	hn004		PC	hn005		PC	PC	
176	366	15	157	aci	4	150	aci	6	146	aci	6	148	aci	4	141	aci		
222	261	69	49	se	67	43	se	69	36	se	75	49	se	71	48	se		
266	365	122	156	acd	132	151	acd	138	147	acd	133	147	acd	139	144	acd		
boca		hb001		PC	hb002		PC	hb003		PC	hb004		PC	hb005		PC	hb006	
162	417	11	29	chi	12	33	chi											
223	418	82	26	sto	84	31	sto											
278	418	153	29	chd	155	30	chd											
154	418							14	40	chi	9	27	chi					
222	418							87	34	sto	85	27	sto					
284	419							159	39	chd	162	28	chd					
148	417												13	26	chi	9	26	chi
222	417												93	31	sto	90	27	sto
291	417												171	27	chd	167	26	chd
menton		hm001		PC	hm002		PC	hm003		PC	hm004		PC	hm005		PC	PC	
112	458	42	39	gni	50	50	gni	34	26	gni	27	23	gni	56	35	gni		
222	503	142	89	me	154	98	me	145	89	me	157	96	me	165	95	me		
322	456	252	36	gnd	258	48	gnd	267	26	gnd	270	27	gnd	268	37	gnd		
orejas		hor001		PC	hor002		PC	hor003		PC	hor004		PC	hor005		PC	hor006	
419	214	46	8	sad	48	6	sad											
406	277	15	92	zyd	19	81	zyd											
395	332	10	136	sbad	13	137	sbad											
419	206							47	9	sad	48	6	sad					
406	276							17	92	zyd	12	90	zyd					
394	341							12	143	sbad	9	142	sbad					
419	197												45	11	sad	49	7	sad
406	277												9	102	zyd	14	95	zyd
392	350												9	153	sbad	10	153	sbad

INDICES																									
TP002	Redondo				MUJERES																				
pele	mp001				PC	mp002			PC	PC			PC			PC									
21	206	24	275	sai	22	261	sai																		
222	47	247	162	tr	218	68	tr																		
419	206	415	272	sad	396	266	sad																		
frente	mf001				PC	mf002			PC	mf003			PC	PC			PC								
69	162	30	161	fti	26	143	fti	20	126	fti															
222	47	174	58	tr	175	44	tr	170	44	tr															
366	161	320	169	ftd	324	145	ftd	321	129	ftd															
cejas	mc001				PC	mc002			PC	mc003			PC	mc004			PC	mc005			PC				
77	219	14	39	fzi	14	42	fzi	18	44	fzi	11	43	fzi	15	43	fzi									
221	221	180	50	tr	190	49	tr	196	49	tr	188	31	tr	198	38	tr									
363	216	352	40	fzd	354	42	fzd	353	44	fzd	353	47	fzd	343	41	fzd									
ojos	mo001				PC	mo002			PC	mo003			PC	mo004			PC	mo005			PC				
107	237	37	33	exi	35	27	exi	34	27	exi	22	27	exi	39	19	exi									
221	221	178	10	se	173	7	se	168	8	se	172	4	se	171	5	se									
344	237	318	33	exd	316	26	exd	306	27	exd	313	29	exd	300	26	exd									
nariz	mn001				PC	mn002			PC	mn003			PC	mn004			PC	mn005			PC				
176	366	12	149	aci	5	138	aci	3	144	aci	10	143	aci	3	141	aci									
221	260	78	32	se	67	37	se	70	39	se	63	39	se	70	33	se									
266	365	127	148	acd	131	140	acd	134	140	acd	126	150	acd	136	143	acd									
boca	mb001				PC	mb002			PC	mb003			PC	mb004			PC	mb005			PC	mb006			PC
163	417	15	33	chi	13	34	chi																		
220	417	81	30	sto	84	32	sto																		
273	418	153	35	chd	154	34	chd																		
155	418							19	23	chi	21	38	chi												
221	417							88	31	sto	87	33	sto												
284	418							159	24	chd	158	38	chd												
149	417													10	26	chi	5	32	chi						
221	418													87	32	sto	84	32	sto						
290	416													163	28	chd	169	32	chd						
menton	mm001				PC	mm002			PC	mm003			PC	mm004			PC	mm005			PC				
112	459	32	41	gni	49	43	gni	43	23	gni	49	33	gni	57	51	gni									
221	504	148	92	me	155	93	me	150	77	me	158	83	me	173	90	me									
322	457	251	40	gnd	260	39	gnd	255	25	gnd	252	30	gnd	275	49	gnd									
orejas	mor001				PC	mor002			PC	mor003			PC	mor004			PC	mor005			PC	mor006			PC
418	217	52	12	sad	50	7	sad																		
405	278	19	90	zyd	15	89	zyd																		
397	330	12	137	sbad	9	139	sbad																		
419	204							51	9	sad	44	5	sad												
405	277							20	86	zyd	10	83	zyd												
393	341							12	147	sbad	7	144	sbad												
418	197													49	9	sad	48	5	sad						
405	278													21	101	zyd	10	99	zyd						
392	351													14	155	sbad	9	155	sbad						

INDICES																				
TP003		Cuadrado				HOMBRES														
pelo		hp001		PC	hp002			PC	PC			PC			PC	PC				
12	206	2	280	sai	7	279	sai													
222	52	225	155	tr	218	112	tr													
423	205	417	280	sad	413	274	sad													
frente		hf001		PC	hf002			PC	hf003			PC	PC			PC	PC			
69	161	40	158	fti	36	140	fti	32	117	fti										
223	52	178	39	tr	181	34	tr	175	35	tr										
366	161	307	154	ftd	313	138	ftd	306	116	ftd										
cejas		hc001		PC	hc002			PC	hc003			PC	hc004			PC	hc005			PC
77	219	9	44	fzi	8	40	fzi	9	45	fzi	18	40	fzi	21	44	fzi				
222	221	186	50	tr	184	50	tr	184	42	tr	183	50	tr	190	52	tr				
364	216	356	40	fzd	356	41	fzd	353	48	fzd	345	35	fzd	339	43	fzd				
ojos		ho001		PC	ho002			PC	ho003			PC	ho004			PC	ho005			PC
106	237	35	28	exi	43	25	exi	30	30	exi	20	28	exi	17	32	exi				
221	222	171	4	se	177	5	se	180	4	se	168	3	se	179	7	se				
345	236	305	25	exd	312	33	exd	321	34	exd	308	31	exd	322	37	exd				
nariz		hn001		PC	hn002			PC	hn003			PC	hn004			PC	hn005			PC
175	365	14	156	aci	3	146	aci	6	148	aci	6	146	aci	6	139	aci				
221	259	68	51	se	68	55	se	67	28	se	72	46	se	69	50	se				
266	366	121	158	acd	132	146	acd	138	146	acd	135	147	acd	138	136	acd				
boca		hb001		PC	hb002			PC	hb003			PC	hb004			PC	hb005			PC
164	416	16	28	chi	11	32	chi													
221	418	82	27	sto	81	31	sto													
277	419	150	30	chd	153	31	chd													
155	417							10	40	chi	4	25	chi							
222	418							82	31	sto	86	27	sto							
284	418							158	39	chd	162	27	chd							
148	418													12	26	chi	5	27	chi	
221	418													94	31	sto	89	27	sto	
290	418													171	29	chd	172	27	chd	
menton		hm001		PC	hm002			PC	hm003			PC	hm004			PC	hm005			PC
82	460	24	35	gni	33	46	gni	39	39	gni	24	39	gni	40	39	gni				
222	527	137	89	me	159	95	me	157	93	me	153	93	me	166	88	me				
356	458	272	31	gnd	269	46	gnd	267	37	gnd	273	42	gnd	273	43	gnd				
orejas		hor001		PC	hor002			PC	hor003			PC	hor004			PC	hor005			PC
422	214	47	7	sad	51	4	sad													
406	277	16	87	zyd	17	79	zyd													
396	331	10	136	sbad	8	137	sbad													
423	204							49	9	sad	51	4	sad							
407	276							13	90	zyd	13	83	zyd							
395	341							6	143	sbad	11	146	sbad							
423	197													46	7	sad	51	3	sad	
407	277													12	104	zyd	11	95	zyd	
393	351													10	154	sbad	9	155	sbad	

INDICES																			
TP003		Cuadrado				MUJERES													
pelo		mp001		PC	mp002			PC	PC			PC			PC				
12	206	13	280	sai	34	264	sai												
222	52	235	149	tr	219	67	tr												
423	205	411	278	sad	384	260	sad												
frente		mf001		PC	mf002			PC	mf003			PC	PC			PC			
69	162	47	160	fti	27	146	fti	33	122	fti									
223	52	175	53	tr	172	48	tr	165	39	tr									
366	162	309	164	ftd	312	147	ftd	313	125	ftd									
cejas		mc001		PC	mc002			PC	mc003			PC	mc004			PC	mc005		
77	218	17	40	fzi	15	46	fzi	25	43	fzi	17	43	fzi	24	41	fzi			
221	221	185	50	tr	192	51	tr	191	46	tr	185	41	tr	194	46	tr			
363	215	350	37	fzd	350	42	fzd	351	41	fzd	349	46	fzd	339	38	fzd			
ojos		mo001		PC	mo002			PC	mo003			PC	mo004			PC	mo005		
107	237	42	33	exi	38	28	exi	34	26	exi	22	26	exi	43	20	exi			
221	221	178	9	se	175	7	se	170	10	se	171	7	se	166	6	se			
343	235	317	34	exd	313	27	exd	304	25	exd	314	33	exd	301	26	exd			
nariz		mn001		PC	mn002			PC	mn003			PC	mn004			PC	mn005		
175	366	13	146	aci	6	135	aci	1	141	aci	7	143	aci	4	142	aci			
222	259	73	43	se	67	39	se	63	38	se	67	40	se	68	40	se			
266	366	126	150	acd	134	139	acd	140	142	acd	130	147	acd	138	141	acd			
boca		mb001		PC	mb002			PC	mb003			PC	mb004			PC	mb005		
161	416	14	33	chi	10	33	chi												
221	417	80	30	sto	82	31	sto												
276	419	151	34	chd	156	35	chd												
154	418							16	24	chi	14	37	chi						
221	418							87	32	sto	86	34	sto						
283	417							159	26	chd	157	37	chd						
148	418													5	25	chi	4	30	chi
221	417													88	32	sto	85	31	sto
292	417													171	29	chd	169	35	chd
menton		mm001		PC	mm002			PC	mm003			PC	mm004			PC	mm005		
83	458	18	32	gni	36	44	gni	42	25	gni	40	33	gni	49	22	gni			
221	527	140	94	me	145	93	me	147	80	me	153	87	me	176	88	me			
357	457	257	41	gnd	268	40	gnd	260	26	gnd	256	28	gnd	274	19	gnd			
orejas		mor001		PC	mor002			PC	mor003			PC	mor004			PC	mor005		
422	213	50	7	sad	49	6	sad												
407	277	20	87	zyd	2	92	zyd												
399	330	20	140	sbad	14	140	sbad												
423	205							53	7	sad	47	6	sad						
407	276							20	91	zyd	6	81	zyd						
396	341							17	147	sbad	8	147	sbad						
423	197													51	9	sad	50	3	sad
408	277													16	98	zyd	7	93	zyd
392	351													17	156	sbad	9	156	sbad

INDICES																		
TP004		Oval				HOMBRES												
pelo		hp001		PC	hp002			PC	PC			PC	PC			PC		
18	206	1	161	sai	5	263	sai											
223	45	218	148	tr	218	99	tr											
419	206	415	257	sad	411	269	sad											
frente		hf001		PC	hf002		PC	hf003		PC	PC			PC	PC			
68	161	37	155	fti	28	129	fti	18	117	fti								
221	45	183	48	tr	188	38	tr	184	34	tr								
365	163	310	153	ftd	317	131	ftd	317	118	ftd								
cejas		hc001		PC	hc002		PC	hc003		PC	hc004		PC	hc005		PC		
76	219	8	41	fzi	7	37	fzi	9	40	fzi	8	40	fzi	16	41	fzi		
221	220	188	49	tr	186	49	tr	183	46	tr	181	49	tr	183	48	tr		
363	217	355	35	fzd	357	34	fzd	352	39	fzd	350	38	fzd	345	40	fzd		
ojos		ho001		PC	ho002		PC	ho003		PC	ho004		PC	ho005		PC		
106	237	34	29	exi	41	27	exi	38	33	exi	24	33	exi	20	32	exi		
222	222	174	10	se	182	8	se	180	10	se	166	4	se	174	4	se		
342	235	312	26	exd	311	31	exd	320	35	exd	307	30	exd	325	34	exd		
nariz		hn001		PC	hn002		PC	hn003		PC	hn004		PC	hn005		PC		
174	365	13	155	aci	3	154	aci	4	148	aci	7	148	aci	5	148	aci		
221	258	67	53	se	65	49	se	68	42	se	76	52	se	70	49	se		
266	365	124	157	acd	134	152	acd	137	146	acd	133	150	acd	141	143	acd		
boca		hb001		PC	hb002		PC	hb003		PC	hb004		PC	hb005		PC		
162	416	15	29	chi	7	29	chi											
222	418	81	27	sto	81	32	sto											
279	419	150	30	chd	154	32	chd											
155	418							8	41	chi	4	24	chi					
222	419							85	33	sto	83	29	sto					
284	418							161	43	chd	166	26	chd					
147	418												10	28	chi	6	25	chi
221	417												93	32	sto	89	26	sto
289	418												168	30	chd	168	26	chd
menton		hm001		PC	hm002		PC	hm003		PC	hm004		PC	hm005		PC		
89	459	35	6	gni	12	17	gni	17	22	gni	5	19	gni	17	19	gni		
221	546	141	88	me	152	95	me	152	93	me	154	77	me	163	74	me		
344	459	270	6	gnd	287	24	gnd	273	28	gnd	287	22	gnd	298	23	gnd		
orejas		hor001		PC	hor002		PC	hor003		PC	hor004		PC	hor005		PC		
415	214	43	8	sad	50	3	sad											
404	277	13	81	zyd	11	85	zyd											
395	332	8	135	sbad	9	138	sbad											
418	205							48	9	sad	53	5	sad					
404	276							14	89	zyd	10	83	zyd					
392	341							6	144	sbad	10	145	sbad					
420	196												48	9	sad	52	4	sad
402	277												15	96	zyd	10	84	zyd
389	352												8	155	sbad	9	156	sbad

INDICES																			
TP004		Oval				MUJERES													
pelo		mp001		PC	mp002			PC	PC			PC	PC			PC			
18	206	6	273	sai	8	273	sai												
222	48	233	141	tr	227	67	tr												
418	204	413	268	sad	409	270	sad												
frente		mf001		PC	mf002		PC	mf003		PC	PC			PC					
68	160	25	164	fti	22	143	fti	20	125	fti									
222	47	175	52	tr	181	46	tr	181	40	tr									
366	161	321	162	ftd	318	142	ftd	323	123	ftd									
cejas		mc001		PC	mc002		PC	mc003		PC	mc004		PC	mc005		PC			
78	219	10	34	fzi	10	41	fzi	17	40	fzi	9	41	fzi	13	43	fzi			
221	220	178	49	tr	188	46	tr	192	48	tr	190	43	tr	195	48	tr			
363	216	354	26	fzd	356	41	fzd	354	40	fzd	352	39	fzd	346	39	fzd			
ojos		mo001		PC	mo002		PC	mo003		PC	mo004		PC	mo005		PC			
108	237	37	35	exi	38	29	exi	37	24	exi	27	24	exi	39	22	exi			
221	220	172	6	se	175	7	se	169	7	se	173	4	se	168	5	se			
345	236	318	36	exd	314	25	exd	302	25	exd	309	32	exd	299	27	exd			
nariz		mn001		PC	mn002		PC	mn003		PC	mn004		PC	mn005		PC			
174	366	14	144	aci	7	139	aci	3	139	aci	9	144	aci	4	138	aci			
222	259	78	41	se	68	37	se	71	37	se	71	35	se	68	25	se			
266	365	128	147	acd	134	138	acd	137	138	acd	131	149	acd	138	140	acd			
boca		mb001		PC	mb002		PC	mb003		PC	mb004		PC	mb005		PC	mb006		
164	417	15	34	chi	11	36	chi												
222	417	81	31	sto	81	30	sto												
277	418	149	35	chd	155	35	chd												
156	418							18	25	chi	17	38	chi						
221	419							90	33	sto	86	30	sto						
284	418							159	25	chd	156	39	chd						
148	418													8	24	chi	8	30	chi
222	418													86	30	sto	83	30	sto
291	417													165	28	chd	167	33	chd
menton		mm001		PC	mm002		PC	mm003		PC	mm004		PC	mm005		PC			
88	459	5	23	gni	20	30	gni	15	11	gni	22	24	gni	22	18	gni			
220	548	146	82	me	152	73	me	148	66	me	155	85	me	171	82	me			
343	459	284	18	gnd	282	28	gnd	287	14	gnd	268	25	gnd	292	18	gnd			
orejas		mor001		PC	mor002		PC	mor003		PC	mor004		PC	mor005		PC	mor006		
417	217	50	7	sad	50	6	sad												
403	277	19	79	zyd	7	83	zyd												
395	330	16	139	sbad	10	138	sbad												
419	205							51	7	sad	48	6	sad						
404	277							19	84	zyd	4	96	zyd						
393	342							16	148	sbad	10	146	sbad						
418	197													52	7	sad	51	3	sad
404	277													20	90	zyd	6	93	zyd
391	351													17	157	sbad	9	156	sbad

INDICES																		
TP005		Triangular				HOMBRES												
pelo		hp001		PC	hp002		PC	PC		PC		PC		PC		PC		
23	206	3	279	sai	10	274	sai											
222	46	217	156	tr	219	99	tr											
421	204	418	277	sad	410	273	sad											
frente		hf001		PC	hf002		PC	hf003		PC	PC		PC		PC			
69	161	42	153	fti	20	142	fti	20	123	fti								
222	48	183	29	tr	186	31	tr	179	24	tr								
366	162	297	154	ftd	327	138	ftd	318	124	ftd								
cejas		hc001		PC	hc002		PC	hc003		PC	hc004		PC	hc005		PC		
76	219	11	36	fzi	9	38	fzi	10	44	fzi	9	37	fzi	10	41	fzi		
222	222	192	48	tr	194	48	tr	184	48	tr	180	50	tr	187	51	tr		
363	216	356	33	fzd	356	37	fzd	349	40	fzd	350	32	fzd	352	38	fzd		
ojos		ho001		PC	ho002		PC	ho003		PC	ho004		PC	ho005		PC		
107	236	34	36	exi	39	26	exi	25	33	exi	24	28	exi	21	35	exi		
222	221	171	6	se	179	7	se	166	15	se	166	15	se	174	8	se		
344	235	313	27	exd	315	33	exd	325	35	exd	306	30	exd	326	37	exd		
nariz		hn001		PC	hn002		PC	hn003		PC	hn004		PC	hn005		PC		
176	366	14	151	aci	4	145	aci	5	142	aci	6	146	aci	2	146	aci		
220	261	68	57	se	68	46	se	68	32	se	75	51	se	70	43	se		
266	365	124	154	acd	133	148	acd	139	140	acd	137	146	acd	139	141	acd		
boca		hb001		PC	hb002		PC	hb003		PC	hb004		PC	hb005		PC		
162	417	14	26	chi	10	30	chi											
222	418	82	28	sto	83	32	sto											
276	419	148	29	chd	155	32	chd											
156	417							11	41	chi	5	26	chi					
222	418							83	33	sto	85	27	sto					
284	419							161	42	chd	159	28	chd					
149	417												9	29	chi	8	24	chi
222	418												94	33	sto	89	27	sto
289	417												167	27	chd	165	28	chd
menton		hm001		PC	hm002		PC	hm003		PC	hm004		PC	hm005		PC		
90	459	4	10	gni	1	8	gni	1	6	gni	1	4	gni	4	7	gni		
220	562	145	53	me	155	61	me	147	65	me	154	68	me	160	66	me		
352	458	294	12	gnd	298	5	gnd	298	4	gnd	299	7	gnd	296	9	gnd		
orejas		hor001		PC	hor002		PC	hor003		PC	hor004		PC	hor005		PC		
420	215	49	9	sad	51	3	sad											
404	278	16	86	zyd	12	83	zyd											
399	332	11	136	sbad	9	138	sbad											
420	205							47	9	sad	53	5	sad					
404	275							10	92	zyd	11	83	zyd					
396	340							9	147	sbad	8	146	sbad					
420	197												47	9	sad	51	4	sad
404	277												14	92	zyd	14	91	zyd
393	351												8	154	sbad	9	156	sbad

INDICES																								
TP005		Triangular				MUJERES																		
pelo		mp001		PC	mp002			PC	PC			PC			PC									
22	206	9	277	sai	19	273	sai																	
222	47	236	147	tr	226	74	tr																	
420	203	416	275	sad	391	270	sad																	
frente		mf001		PC	mf002			PC	mf003			PC	PC			PC								
68	162	30	164	fti	33	144	fti	23	127	fti														
222	45	174	55	tr	173	47	tr	174	45	tr														
365	162	308	166	ftd	309	144	ftd	320	129	ftd														
cejas		mc001		PC	mc002			PC	mc003			PC	mc004			PC	mc005			PC				
77	219	10	37	fzi	14	42	fzi	21	43	fzi	12	42	fzi	20	41	fzi								
222	220	182	51	tr	188	46	tr	193	47	tr	190	45	tr	194	46	tr								
363	216	353	33	fzd	355	38	fzd	353	38	fzd	345	43	fzd	341	39	fzd								
ojos		mo001		PC	mo002			PC	mo003			PC	mo004			PC	mo005			PC				
108	237	42	32	exi	40	29	exi	36	25	exi	32	27	exi	44	20	exi								
221	221	179	9	se	176	8	se	171	9	se	170	11	se	169	10	se								
344	235	315	31	exd	312	27	exd	299	25	exd	312	32	exd	296	27	exd								
nariz		mn001		PC	mn002			PC	mn003			PC	mn004			PC	mn005			PC				
175	366	14	146	aci	6	137	aci	2	141	aci	10	147	aci	3	141	aci								
220	260	76	40	se	66	43	se	72	38	se	69	46	se	70	45	se								
266	366	128	147	acd	135	139	acd	136	137	acd	133	148	acd	135	139	acd								
boca		mb001		PC	mb002			PC	mb003			PC	mb004			PC	mb005			PC	mb006			PC
161	417	19	34	chi	14	35	chi																	
222	418	83	33	sto	83	33	sto																	
278	419	149	35	chd	154	35	chd																	
156	418							19	23	chi	18	37	chi											
222	418							89	32	sto	87	32	sto											
284	418							158	26	chd	154	40	chd											
150	418													10	26	chi	10	30	chi					
221	418													86	31	sto	87	31	sto					
279	418													165	28	chd	164	33	chd					
menton		mm001		PC	mm002			PC	mm003			PC	mm004			PC	mm005			PC				
92	460	1	40	gni	2	16	gni	6	12	gni	1	8	gni	22	9	gni								
223	563	145	55	me	151	65	me	145	63	me	153	47	me	170	57	me								
355	457	290	34	gnd	294	15	gnd	291	11	gnd	292	10	gnd	297	4	gnd								
orejas		mor001		PC	mor002			PC	mor003			PC	mor004			PC	mor005			PC	mor006			PC
418	213	53	6	sad	51	4	sad																	
405	276	19	90	zyd	4	89	zyd																	
398	331	13	139	sbad	12	138	sbad																	
420	206							53	8	sad	50	4	sad											
404	278							19	87	zyd	9	92	zyd											
396	342							13	146	sbad	9	146	sbad											
421	197													53	9	sad	51	5	sad					
405	276													19	94	zyd	3	96	zyd					
392	351													15	156	sbad	8	157	sbad					

## Apéndice VI

Tipos de rostro y clasificación de tipos de partes del rostro (**nomenclaturas**) hombre/ mujer

TIPO DE ROSTRO		PARTES DEL ROSTRO	1.Pelo	hp001	hp002					
				mp001	mp002					
	1.Redondo			2.Frente	hf001	hf002	hf003			
					mf001	mf002	mf003			
	2.Oval			3.Cejas	hc001	hc002	hc003	hc004	hc005	
					mc001	mc002	mc003	mc004	mc005	
	3.Triangular			4.Ojos	ho001	ho002	ho003	ho004	ho005	
					mo001	mo002	mo003	mo004	mo005	
	4.Cuadrado			5.Nariz	hn001	hn002	hn003	hn004	hn005	
					mn001	mn002	mn003	mn004	mn005	
	5.Rectangular			6.Boca	hb001	hb002	hb003	hb004	hb005	hb006
					mb001	mb002	mb003	mb004	mb005	mb006
				7.Menton	hm001	hm002	hm003	hm004	hm005	
					mm001	mm002	mm003	mm004	mm005	
				8.Orejas	hor001	hor002	hor003	hor004	hor005	hor006
					mor001	mor002	mor003	mor004	mor005	mor006

## Apéndice VII































Resultados de métricas objetivas de calidad de bordes: Energía de bordes, Densidad de trazos y Contraste































ID,Energia de Bordes,Densidad de Trazos,%,Contraste
h_cua_p.lac_c.arq_o.estr_n.abul_b.gra.lab.del_m.cua.jpg,5956.457084117948,9.968560606060606,-22.225698904025705
h_cua_p.lac_c.rec_o.peq_n.resp_b.med.lab.del_m.sob.jpg,6040.959599281637,9.567424242424243,-22.954955913935606
h_cua_p.lac_c.sobres_o.asia_n.cha_b.peq.lab.del_m.red.jpg,6996.755008776633,10.043560606060606,-25.866477052645195
h_cua_p.lac_c.tria_o.alm_n.agui_b.gra.lab.gru_m.redu.jpg,7673.061971850272,8.159469696969698,-36.73486322849996
h_cua_p.riz_c.rot_o.prom_n.resp_b.peq.lab.gru_m.alar.jpg,5595.077583086897,6.335227272727273,-35.67265177882868
h_ov_p.lac_c.arq_o.prom_n.cha_b.gra.lab.del_m.red.jpg,6274.616955847276,9.453030303030303,-24.143897126347554
h_ov_p.lac_c.rec_o.peq_n.agui_b.peq.lab.del_m.alar.jpg,5975.416872608551,8.807954545454546,-24.727456416661227
h_ov_p.riz_c.rot_o.estr_n.resp_b.peq.lab.gru_m.sob.jpg,6104.9877982782,7.049242424242425,-35.623698975798305
h_ov_p.riz_c.sobres_o.asia_n.abul_b.med.lab.gru_m.cua.jpg,7494.060493711148,7.454924242424242,-41.37595627651254
h_ov_p.riz_c.tri_o.alm_n.rec_b.gra.lab.gru_m.redu.jpg,7504.660464285018,7.816287878787878,-37.922791579580945
h_rec_p.lac_c.rot_o.peq_n.abul_b.gra.lab.del_m.sob.jpg,5848.171740068207,9.497348484848485,-22.76700698681708
h_rec_p.lac_c.sobres_o.estr_n.rec_b.peq.lab.del_m.cua.jpg,7167.622154625492,9.761742424242424,-27.51718650993243
h_rec_p.lac_c.tria_o.asi_n.cha_b.med.lab.del_m.redu.jpg,6617.915037419317,9.894318181818182,-24.498298519548342
h_rec_p.riz_c.arq_o.alm_n.agui_b.peq.lab.gru_m.red.jpg,7238.8199927650085,7.481439393939395,-38.42525700368793
h_rec_p.riz_c.rec_o.prom_n.resp_b.med.lab.gru_m.alar.jpg,6873.864506630451,6.435227272727273,-42.973008188962126
h_red_p.lac_c.arq_o.peq_n.agui_b.peq.lab.del_m.alar.jpg,5513.728910773404,8.728409090909091,-23.527634051235623
h_red_p.lac_c.rec_o.peq_n.resp_b.med.lab.del_m.red.jpg,5884.56929508295,8.805303030303030,-24.51616418389642
h_red_p.riz_c.rot_o.peq_n.abul_b.med.lab.gru_m.cua.jpg,6137.018947464477,6.936363636363636,-35.02706125314964
h_red_p.riz_c.sobres_o.peq_n.rec_b.gra.lab.gru_m.sob.jpg,5396.418960699521,6.870075757575758,-32.736944102241694
h_red_p.riz_c.tri_o.peq_n.cha_b.peq.lab.gru_m.redu.jpg,5592.308838046489,7.370833333333334,-30.263711101086642
h_tri_p.lac_c.arq_o.asia_n.cha_b.gra.lab.del_m.cua.jpg,6367.616285876198,9.410984848484848,-24.94226411356354
h_tri_p.lacio_c.rot_o.peq_n.abul_b.peq.lab.del_m.red.jpg,5816.539430145292,9.767803030303030,-21.14331199065478
h_tri_p.lacio_c.tri_o.estr_n.rec_b.med.lab.del_m.redu.jpg,6868.9022689884105,10.003409090909091,-25.3978709183352
h_tri_p.riz_c.rec_o.alm_n.agui_b.med.lab.gru_m.sob.jpg,6324.09230537808,7.418939393939395,-33.42459161126351
h_tri_p.riz_c.sobres_o.prom_n.resp_b.gra.lab.gru_m.alar.jpg,5149.099376809322,6.343181818181819,-33.94152919197248
m_cua_p.lac_c.arq_o.estr_n.abul_b.gra.lab.del_m.cua.jpg,6650.934130861139,7.756818181818181,-32.68483772972675
m_cua_p.lac_c.rec_o.peq_n.rec_b.med.lab.del_m.sob.jpg,6669.090527501838,7.730303030303030,-33.00382378788939
m_cua_p.lac_c.sobres_o.asia_n.cha_b.peq.lab.del_m.red.jpg,7217.568505167852,7.5,-37.147777777777776
m_cua_p.riz_c.rot_o.prom_n.res_b.peq.lab.gru_m.alar.jpg,8950.347428144967,8.119318181818182,-44.57744719706551
m_cua_p.riz_c.tria_o.alm_n.agui_b.gra.lab.gru_m.redu.jpg,8949.66472261666,7.676515151515151,-47.28294947800731
m_ov_p.lac_c.arq_o.prom_n.cha_b.gra.lab.del_m.red.jpg,7399.130528000964,7.988257575757577,-34.06869793657174
m_ov_p.lac_c.rec_o.peq_n.agui_b.peq.lab.del_m.alar.jpg,6899.391802605361,7.743181818181818,-33.88888253074643
m_ov_p.riz_c.rot_o.estr_n.resp_b.peq.lab.gru_m.sob.jpg,8740.799774278863,7.502651515151515,-47.52698372190201
m_ov_p.riz_c.sobres_o.asia_n.abul_b.med.lab.gru_m.cua.jpg,8763.052014315377,7.643560606060607,-47.33402872984888
m_ov_p.riz_c.tria_o.alm_n.rec_b.gra.lab.gru_m.redu.jpg,8917.181653017331,7.737878787878788,-46.75489737941845
m_rec_p.lac_c.rot_o.peq_n.abul_b.gra.lab.del_m.sob.jpg,6923.2000355437285,7.868181818181819,-32.219564772165995
m_rec_p.lac_c.sobres_o.estr_n.rec_b.peq.lab.del_m.cua.jpg,6992.715146109861,7.815909090909091,-34.01830133602357
m_rec_p.lac_c.tria_o.asia_n.cha_b.med.lab.del_m.redu.jpg,6709.969032620072,7.428409090909091,-33.673270446847084
m_rec_p.riz_c.arq_o.alm_n.agui_b.peq.lab.gru_m.red.jpg,8887.095133047389,7.698863636363637,-46.93697548720641
m_rec_p.riz_c.rec_o.prom_n.resp_b.med.lab.gru_m.alar.jpg,9225.091889537336,7.939772727272727,-47.57274007892241
m_red_p.lac_c.arq_o.peq_n.agui_b.peq.lab.del_m.alar.jpg,6767.230724274392,7.685227272727273,-32.92688034042118
m_red_p.lac_c.rec_o.peq_n.resp_b.med.lab.del_m.red.jpg,6663.479024238975,7.151136363636364,-35.40993863476214
m_red_p.riz_c.rot_o.peq_n.abul_b.med.lab.gru_m.cua.jpg,8682.972994424303,7.886742424242424,-45.08259166448812
m_red_p.riz_c.sobres_o.peq_n.rec_b.gra.lab.gru_m.sob.jpg,9150.306886621998,7.871212121212121,-47.56592441290772
m_red_p.riz_c.tria_o.peq_n.cha_b.peq.lab.gru_m.redu.jpg,8769.371622633558,7.741666666666666,-46.24079638130701
m_tria_p.lac_c.arq_o.asia_n.cha_b.gra.lab.del_m.cua.jpg,6756.523249081224,8.026136363636363,-32.069799434573724
m_tria_p.lac_c.rot_o.peq_n.abul_b.peq.lab.del_m.red.jpg,6974.884685682566,7.715909090909092,-34.552207368944806
m_tria_p.lac_c.tria_o.estr_n.rec_b.med.lab.del_m.redu.jpg,6705.107997713215,7.454924242424242,-34.77715661336032
m_tria_p.riz_c.rec_o.alm_n.agui_b.med.lab.gru_m.sob.jpg,8861.992219923584,7.646212121212121,-47.25285899076201
m_tria_p.riz_c.sob_o.prom_n.resp_b.gra.lab.gru_m.alar.jpg,9570.196695889264,8.011742424242424,-48.59921542839902

## Apéndice VIII

Imágenes de 50 retratos generados de acuerdo a tipos de rostro y las 7 variantes (zip)

Nombre

-  h\_cua\_p.lac\_c.arq\_o.estr\_n.abul\_b.gra.lab.del\_m.cua.jpg
  -  h\_cua\_p.lac\_c.rec\_o.peq\_n.resp\_b.med.lab.del\_m.sob.jpg
  -  h\_cua\_p.lac\_c.sobres\_o.asia\_n.cha\_b.peq.lab.del\_m.red.jpg
  -  h\_cua\_p.red\_c.tria\_o.alm\_n.agui\_b.gra.lab.gru\_m.redu.jpg
  -  h\_cua\_p.riz\_c.rot\_o.prom\_n.resp\_b.peq.lab.gru\_m.alar.jpg
  -  h\_ov\_p.lac\_c.arq\_o.prom\_n.cha\_b.gra.lab.del\_m.red.jpg
  -  h\_ov\_p.lac\_c.rec\_o.peq\_n.agui\_b.peq.lab.del\_m.alar.jpg
  -  h\_ov\_p.riz\_c.rot\_o.estr\_n.resp\_b.peq.lab.gru\_m.sob.jpg
  -  h\_ov\_p.riz\_c.sobres\_o.asia\_n.abul\_b.med.lab.gru\_m.cua.jpg
  -  h\_ov\_p.riz\_c.tri\_o.alm\_n.rec\_b.gra.lab.gru\_m.redu.jpg
- 
-  h\_rec\_p.lac\_c.rot\_o.peq\_n.abul\_b.gra.lab.del\_m.sob.jpg
  -  h\_rec\_p.lac\_c.sobres\_o.estr\_n.rec\_b.peq.lab.del\_m.cua.jpg
  -  h\_rec\_p.lac\_c.tria\_o.asi\_n.cha\_b.med.lab.del\_m.redu.jpg
  -  h\_rec\_p.riz\_c.arq\_o.alm\_n.agui\_b.peq.lab.gru\_m.red.jpg
  -  h\_rec\_p.riz\_c.rec\_o.prom\_n.resp\_b.med.lab.gru\_m.alar.jpg
  -  h\_red\_p.lac\_c.arq\_o.peq\_n.agui\_b.peq.lab.del\_m\_alar.jpg
  -  h\_red\_p.lac\_c.rec\_o.peq\_n.resp\_b.med.lab.del\_m\_red.jpg
  -  h\_red\_p.riz\_c.rot\_o.peq\_n.abul\_b.med.lab.gru\_m\_cua.jpg
  -  h\_red\_p.riz\_c.sobres\_o.peq\_n.rec\_b.gra.lab.gru\_m\_sob.jpg
  -  h\_red\_p.riz\_c.tri\_o.peq\_n.cha\_b.peq.lab.gru\_m\_redu.jpg
- 
-  h\_rec\_p.lac\_c.rot\_o.peq\_n.abul\_b.gra.lab.del\_m.sob.jpg
  -  h\_rec\_p.lac\_c.sobres\_o.estr\_n.rec\_b.peq.lab.del\_m.cua.jpg
  -  h\_rec\_p.lac\_c.tria\_o.asi\_n.cha\_b.med.lab.del\_m.redu.jpg
  -  h\_rec\_p.riz\_c.arq\_o.alm\_n.agui\_b.peq.lab.gru\_m.red.jpg
  -  h\_rec\_p.riz\_c.rec\_o.prom\_n.resp\_b.med.lab.gru\_m.alar.jpg
  -  h\_red\_p.lac\_c.arq\_o.peq\_n.agui\_b.peq.lab.del\_m\_alar.jpg
  -  h\_red\_p.lac\_c.rec\_o.peq\_n.resp\_b.med.lab.del\_m\_red.jpg
  -  h\_red\_p.riz\_c.rot\_o.peq\_n.abul\_b.med.lab.gru\_m\_cua.jpg
  -  h\_red\_p.riz\_c.sobres\_o.peq\_n.rec\_b.gra.lab.gru\_m\_sob.jpg
  -  h\_red\_p.riz\_c.tri\_o.peq\_n.cha\_b.peq.lab.gru\_m\_redu.jpg

-  h\_tri\_p.lac\_c.arq\_o.asia\_n.cha\_b.gra.lab.del\_m.cua.jpg
-  h\_tri\_p.lacio\_c.rot\_o.peq\_n.abul\_b.peq.lab.del\_m.red.jpg
-  h\_tri\_p.lacio\_c.tri\_o.estr\_n.rec\_b.med.lab.del\_m.redu.jpg
-  h\_tri\_p.riz\_c.rec\_o.alm\_n.agui\_b.med.lab.gru\_m.sob.jpg
-  h\_tri\_p.riz\_c.sobres\_o.prom\_n.resp\_b.gra.lab.gru\_m.alar.jpg
-  m\_cua\_p.lac\_c.arq\_o.estr\_n.abul\_b.gra.lab.del\_m.cua.jpg
-  m\_cua\_p.lac\_c.rec\_o.peq\_n.rec\_b.med.lab.del\_m.sob.jpg
-  m\_cua\_p.lac\_c.sobres\_o.asia\_n.cha\_b.peq.lab.del\_m.red.jpg
-  m\_cua\_p.riz\_c.rot\_o.prom\_n.res\_b.peq.lab.gru\_m.alar.jpg
-  m\_cua\_p.riz\_c.tria\_o.alm\_n.agui\_b.gra.lab.gru\_m.redu.jpg
  
-  m\_red\_p.lac\_c.arq\_o.peq\_n.agui\_b.peq.lab.del\_m.alar.jpg
-  m\_red\_p.lac\_c.rec\_o.peq\_n.resp\_b.med.lab.del\_m.red.jpg
-  m\_red\_p.riz\_c.rot\_o.peq\_n.abul\_b.med.lab.gru\_m.cua.jpg
-  m\_red\_p.riz\_c.sobres\_o.peq\_n.rec\_b.gra.lab.gru\_m.sob.jpg
-  m\_red\_p.riz\_c.tria\_o.peq\_n.cha\_b.peq.lab.gru\_m.redu.jpg
-  m\_tria\_p.lac\_c.arq\_o.asia\_n.cha\_b.gra.lab.del\_m.cua.jpg
-  m\_tria\_p.lac\_c.rot\_o.peq\_n.abul\_b.peq.lab.del\_m.red.jpg
-  m\_tria\_p.lac\_c.tria\_o.estr\_n.rec\_b.med.lab.del\_m.redu.jpg
-  m\_tria\_p.riz\_c.rec\_o.alm\_n.agui\_b.med.lab.gru\_m.sob.jpg
-  m\_tria\_p.riz\_c.sob\_o.prom\_n.resp\_b.gra.lab.gru\_m.alar.jpg
  
-  m\_ov\_p.lac\_c.arq\_o.prom\_n.cha\_b.gra.lab.del\_m.red.jpg
-  m\_ov\_p.lac\_c.rec\_o.peq\_n.agui\_b.peq.lab.del\_m.alar.jpg
-  m\_ov\_p.riz\_c.rot\_o.estr\_n.resp\_b.peq.lab.gru\_m.sob.jpg
-  m\_ov\_p.riz\_c.sobres\_o.asia\_n.abul\_b.med.lab.gru\_m.cua.jpg
-  m\_ov\_p.riz\_c.tria\_o.alm\_n.rec\_b.gra.lab.gru\_m.redu.jpg
-  m\_rec\_p.lac\_c.rot\_o.peq\_n.abul\_b.gra.lab.del\_m.sob.jpg
-  m\_rec\_p.lac\_c.sobres\_o.estr\_n.rec\_b.peq.lab.del\_m.cua.jpg
-  m\_rec\_p.lac\_c.tria\_o.asia\_n.cha\_b.med.lab.del\_m.redu.jpg
-  m\_rec\_p.riz\_c.arq\_o.alm\_n.agui\_b.peq.lab.gru\_m.red.jpg
-  m\_rec\_p.riz\_c.rec\_o.prom\_n.resp\_b.med.lab.gru\_m.alar.jpg



zip 50.zip

## ANEXOS

### Anexo 1. Participación en Congreso Nacional de Física y Póster

**LXVII**  
CONGRESO  
NACIONAL  
DE FÍSICA

CERTIFICADO  
DE PARTICIPACION



LA SOCIEDAD MEXICANA DE FÍSICA, A. C.

AGRADECE LA PARTICIPACIÓN DE:  
(ESTUDIANTE)

**MARTHA EDALI BARREIRO ORTIZ**

CENTRO DE INVESTIGACION EN  
INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS

**EN EL LXVII CONGRESO NACIONAL DE FÍSICA**

DEL 6 AL 11 DE OCTUBRE DE 2024,  
**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA**  
CHIHUAHUA, CHIH.

DR. JULIO G. MENDOZA ÁLVAREZ  
PRESIDENTE



**uach**

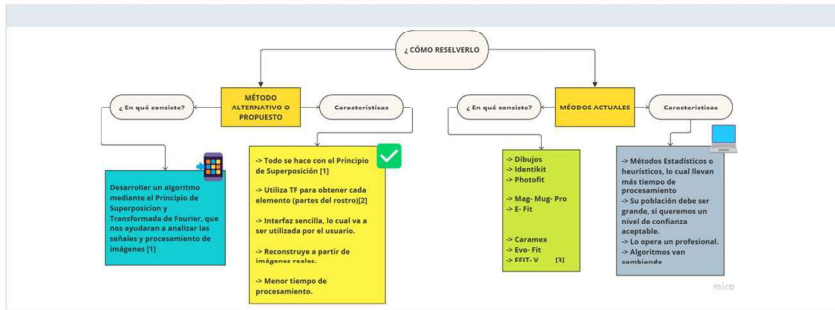


**RESUMEN**

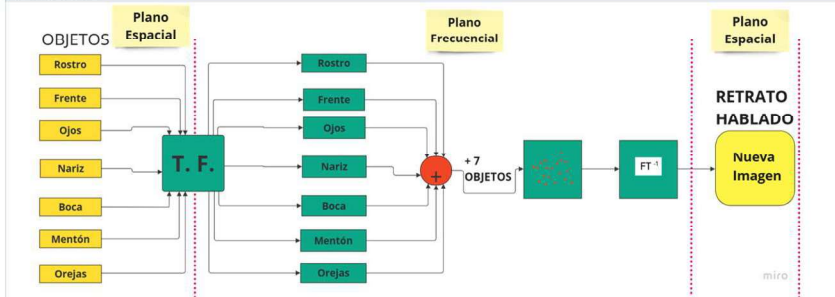
El principio de superposición [1] es una propiedad de los sistemas lineales, que junto con la Transformada de Fourier [2] se obtiene una poderosa herramienta para obtener el reconocimiento de personas a través de su retrato hablado, que impacta en temas de seguridad y criminalística acotado a la región mexicana. El estudio de los patrones que conforman un retrato hablado se liga directamente con un sistema lineal que permite obtener un rostro, tal que obedece a la descripción visual que una persona víctima de la inseguridad ha declarado presentando una denuncia.

**PROPUESTA**

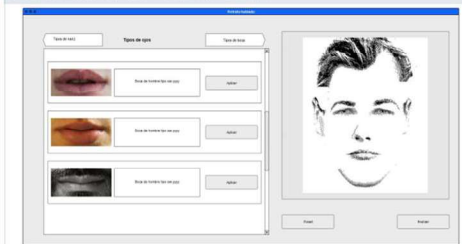
Obtener un reconocimiento de personas a través del Retrato Hablado, en el ámbito de seguridad y criminalística acotado solo en la región mexicana



**METODOLOGIA**



**CREAR UNA APLICACIÓN: Interfaz de Usuario**



**AVANCES**

Nuestra propuesta presenta una estructura base para futuros procesos, utilizando herramientas matemáticas que permiten capturar la percepción de la víctima y construir una representación básica del rostro con operaciones menos complejas, lo que reduce significativamente la demanda de recursos frente a técnicas como los algoritmos de inteligencia artificial, que requieren grandes cantidades de datos y procesamiento intensivo. Entre sus ventajas se encuentran la mayor precisión y flexibilidad al construir retratos más detallados y personalizados, así como una mejor integración de la percepción subjetiva de la víctima.

**REFERENCIAS:**

[1] Oppenheim, A. V., Willsky, A. S., & Nawab, S. H. 1997. Signals & Systems. Prentice Hall.  
 [2] Bracewell, R. N. 2000. The Fourier transform and its applications. New York: McGraw-Hill.  
 [3] Cuevas-Ramírez, L. F. (2021). Vista de La evolución del retrato hablado: del labio y el papel a los algoritmos genéticos. Retrieved August 23, 2023, https://revistasencias.inaoe.gob.mx/index.php/CIICAP/view/429/148

## Anexo 2. Participaciones en taller o curso para la retribución social

**Noche de las ESTRELLAS**<sup>®</sup>

El Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Morelos y el Comité Nacional de Noche de las Estrellas otorga el presente reconocimiento a:

**Martha Edali Barreiro Ortiz**

Por su participación como tallerista en el evento: "Noche de las Estrellas" 2024, efectuado en Jojutla, Morelos.

*Jaimé Edgenio Araú Roffiel*  
Jaimé Edgenio Araú Roffiel  
Director General del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Morelos.

*Alejandra Ramírez Mendoza*  
Alejandra Ramírez Mendoza  
Directora del Centro Morelense de Comunicación de la Ciencia.

COMITÉ NACIONAL DE LA NOCHE DE LAS ESTRELLAS | [nochedelastrellas.org.mx](http://nochedelastrellas.org.mx) | [/nochedelastrellasmx](https://www.facebook.com/nochedelastrellasmx) | [X@nochedelastrellas](https://twitter.com/nochedelastrellas)

MORELOS | ECONOMÍA | CCTEM | MUSEO DE CIENCIAS





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

JEFATURA DE POSGRADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



Cuernavaca, Morelos, 26 de enero de 2026.

**DR. ARTURO MOLINA OCAMPO**  
**COORDINADOR DEL POSGRADO**  
**EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**  
**P R E S E N T E**

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: **Retrato Hablado Mediante sistemas lineales**, que presenta la alumna **Martha Edali Barreiro Ortiz**, para obtener el título de la **Maestría en Ingeniería y Ciencias Aplicadas**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**.

Atentamente  
*Por una humanidad culta*

**DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE**

**DR. JACOB LICEA RODRÍGUEZ**

**DRA. ROCÍO ALFONSINA LIZÁRRAGA MORALES**

**DR. ROBERTO ALAN BELTRÁN VARGAS**

**DR. OMAR PALILLERO SANDOVAL**

Se adiciona efirma UAEM



Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209, Edificio 65,  
Tel. 777 329 70 00 Ext. 6208 / ciicap.posgrado@uaem.mx

**UAEM**  
RECTORÍA  
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANO INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

#### Sello electrónico

**J JESUS ESCOBEDO ALATORRE | Fecha:2026-01-26 14:18:13 | FIRMANTE**

aZYLHnHP9JvI9iHR6MerwDQu0Rdl9k9P7REekXOQbYNJ+A9uPbPo4vD3uGp2oQWvZB0odeaaS4c5gZkh/eQBTIKPpNPXsUIBPHa1+J4oYaS17XHeDeXnmEfnVpPb18Z+ebE095vMY+n06kzp4kP9CxlREN4S58f89xQeqe8S/b16Q1H3Ldx6j1EuGgHA8K+YORIXgDuNwv5kIaHYJswIIX6n3TYOgGaf/oO7x5quzJM0KLu855NOLqnXSmf/nCMI2HwedxDG3U1i4IMyRfmKQ9Ap/0LzjtNEiMzfeCcCTUGo5IDN+sqkQ9BtTPH6AMAT9/R8153Wchb581Hlp7H7g==

**ROCÍO ALFONSINA LIZÁRRAGA MORALES | Fecha:2026-01-26 15:53:39 | FIRMANTE**

WAKh4T6zT2t5L/eb64ahX1F+QV9I1QaHaR3Pbo3NMRaP/doP7CEtEzG8D+z3tZ3N/FvLYSlgoVDkvxm6aiMXXS7W7tOLEf/3DwzL2hBZF/7ThLHTNIAEsX6ml+bahOgZssypCHF AH4RV+YmNeJL178om6UWv5t2P4Dn3DjC18FeiibViCmOVd5jPls6ZVWrJ9iCsBPXZZ2quxU1qYB93vHp81CmMeus9IFFMaFFH04oBFuk8VXibW5563mzLnwOESD/ujyfBL9lin14pGGOPiW11AR2A4YBHxUCBcNKbMiXQq3HOKwyXJNCFcUmo9ynebJZojpILFrJ5UbcigCeEQ==

**OMAR PALILLERO SANDOVAL | Fecha:2026-01-27 08:03:53 | FIRMANTE**

J+4ImegIS5C53hiOdPxZEiMjbbMfBV6XOtm5LwcEA7GjeCj3LL8e+KEib9ZRalEcl+CaHMm+dm5F1Y7YIXqZaBK6J8gcDn7SfgwsNQYD2X6pGbjTc+6wvOxUTxjgzuy/Wx8QlAg/lyfNdImPMwzTNaJ3ZUZs7zWLPw3/k3llsESqTqQhKpi3oxlxcHs3gFTMLMUUD59kXC160szoVyjsaSFxARzFY2uXh4pbME3scQyoH1jUD88cLtp6un89FiYYC0vB7X8rvckbY1Pmq t7fnsFC0AVMOpFpq0+Wzmr2sDtV4j3Qe+07r8TqSbkiKYvHIAMdHuEWAaFET+m/wQ==

**ROBERTO ALAN BELTRAN VARGAS | Fecha:2026-01-27 08:31:07 | FIRMANTE**

cu7WZzpKExpJxxVbuxr9qT0pf2xq6qWMVEM+6IBG4MJDGPFillaxKW44/I9L6kTcgDvEhUdDg3IPMEvHKh8dmE1xblwchYHDr2Ql8uV8Slc7GcQqFJxOQej412fIAKl6gJYvcBNR34eMnxHR4/so0otHrvjFBHxB65/otZPUz3WicJc5sVhuREpWUdh5BpcGh1MO/vLmAVB9IH0vFGVcxnwdPBEwOS+S+Fxu3BY9jGdpOzQLXr0ONWoS8CEW/zGmSAYWF/MU0e6Puc8Kl5bbtZie+hQo5+6yUx3m3UrOdDUXFTcXfmx+d+bQof7hk0um4Ng+Z3GqUa8kw6UKuhMtw==

**JACOB LICEA RODRIGUEZ | Fecha:2026-01-27 09:09:32 | FIRMANTE**

LLh6t92q8FNvUjwXUlayl11eszgll1oDV/t6HSraGuk7w0L5ru2/MB817iJwvclYkScRhVikL0ilfbVvWroZ7+f7XeUn7fXfiv8Iago8nGry4dn3BGyQcLYXGIACYj5NTEuWqCHSDpsmeEo/utHh7j6KbD6GYrd0fhJn0c7L4eeDSHrmWfAA/taer5SvDWsWVWwkiQOidZJDVtwq6K/iozj+t6ccDs6r3PKN+qqngwapanbzZOWken1E/925AA0ykUtqW+pMNVwzwbT0BgP8Zu o7YK+8ZCIDSptwRkFIUtdJcTeroZaohf3ChZwKfo/Esr4dq5vIXwCFQ/NRDZw==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



4n9wu0YgV

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/HoNieonkzRqD23PIGHQJqaRDM55fWT>



UAEM  
RECTORÍA  
2023-2029