



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE MEDICINA
LICENCIATURA EN CIENCIA FORENSE**

**CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD
DERMATOGLÍFICA DE BIOMÉTRICOS
DACTILARES EN POBLACIÓN MEXICANA: UNA
PROPUESTA DE ANÁLISIS PARA APLICACIÓN
FORENSE**

Facultad de Medicina



T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN CIENCIA FORENSE**

P R E S E N T A:

DE LA CRUZ ORTUÑO ALIN DANIELA

**DIRECTORA DE TESIS
M. C. CHANTAL LOYZANCE VALDÉS**



**CIENCIA
FORENSE**
UNAM

CDMX, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatoria

*“La humanidad necesita hombres prácticos,
que saquen el mayor provecho de su trabajo, y sin olvidar el interés general,
salvaguarden sus propios intereses.*

*Pero la humanidad también necesita soñadores,
para quiénes el desarrollo de una tarea sea tan cautivante
que les resulte imposible dedicar su atención a su propio beneficio.”*

— Marie Curie

A USTEDES, que buscan sin descanso y con esperanza a sus seres queridos,
abrazo su lucha y me preparo día a día.
Hasta encontrarles e identificarles.

A USTEDES, quienes constantemente crean espacios desde sus ámbitos
para nosotras. Por más mujeres en la ciencia.

A MACARENA, por alegrar y acompañar
las noches y los días de trabajo que estuvo conmigo.

A mis PADRES, cuyo esfuerzo hoy se materializa,
a mis SOBRINAS y mis HERMANAS, mi mayor fuente de motivación de vida,
a TI, mi compañero, mi mejor amigo y el fiel acompañante de mis días y
a MÍ, que, a pesar de las adversidades, sigo en pie.

Agradecimientos

A la **M. C. Chantal Loyzance** responsable de las líneas de investigación en Dactiloscopia en el Laboratorio de Antropología y Odontología Forense (LAOF) de la Licenciatura en Ciencia Forense de la UNAM y tutora de esta tesis, a quien le tengo infinito agradecimiento por el apoyo incondicional, la unión, el compromiso, la comprensión y el aprendizaje personal y académico que he adquirido durante el tiempo en el que trabajamos juntas, por el impulso que ha representado para comenzar mi trayectoria académica y por dotarme de herramientas y nuevas experiencias que me preparan mejor para mi desempeño laboral. Gracias por no sólo compartirme sus conocimientos, su confianza y su tiempo en las videollamadas (constantemente de más de dos horas) y fuera de ellas, también por ser la principal guía de éste proyecto, por escuchar y apoyar cada idea que se me ocurría invitándome siempre a cuestionar para crecer, no hubo un solo momento en el que no sintiera su respaldo. Éste capítulo ha concluido, sin embargo, no deseo más que éste sea el primero de muchos más proyectos juntas. Inagotables mis agradecimientos y mi afecto por abrirme las puertas y haber confiado en mí, sin si quiera imaginarlo, le dio un giro completo a mí vida en el momento exacto en el que lo necesitaba. Las huellas unen. Imposible resumir tanto en tan poco, pero por todo esto y más, gracias Chantal.

Al **Dr. José Meljem Moctezuma**, por la confianza brindada a la Licenciatura en Ciencia Forense, en especial, por su apoyo al área de la Identificación Humana al abrir vínculos para la obtención de material que, sin duda, es aprovechado para la generación de un nuevo conocimiento.

A la **Dra. Sofía Huerta Pacheco**, Investigadora CONACYT, por el apoyo **incondicional** al compartirme de su tiempo y sus conocimientos durante las asesorías que sin ningún compromiso formal aceptó darme; por de manera cálida, clara y paciente, estar ahí para aclarar las dudas que se presentaban, por cada recomendación realizada para potenciar éste proyecto y por ser una inspiración para adentrarme al mundo de la ciencia de los datos. Usted es un claro ejemplo de que el mundo necesita más personas que amen lo que hacen.

A mis profesores de la licenciatura, pero especialmente a la **Dra. Iveth Gil-Chavarría** responsable de las líneas de investigación en Odontología en el LAOF y al **Dr. Mirsha Quinto-Sánchez** responsable de las líneas de investigación en Antropología y Arqueología en el LAOF, quienes han representado una gran motivación y, en definitiva, junto con la Mtra. Chantal son por quienes mi mayor inclinación de vida, es la búsqueda e identificación de personas. Tengan por seguro que, a dónde sea que me desempeñe, la frase ya famosa “Praxis basada en evidencia” y el pensamiento crítico irá conmigo. Gracias por creer en mí y por abrir espacios para el desarrollo de jóvenes curiosos con muchas ganas de hacer el cambio. Les quiero y les admiro.

A la **Licenciatura en Ciencia Forense**, por ser mi segunda casa y por brindarme el apoyo necesario para culminar mis estudios, especialmente, gracias a todos y todas las docentes que concentraron sus esfuerzos en sacar adelante la educación del alumnado durante la crisis sanitaria. Aprovechando el espacio, extiendo mis agradecimientos a los profesores **Guillermo Romo, Jorge Luis Zepeda y Laura Alicia Escobar**, por su apoyo incondicional durante mi estancia en el competitivo espacio forense.

A mi **mamá**, por impulsarme a tomar nuevos retos desde corta edad y por siempre luchar por darme herramientas para mi sano desarrollo, por enseñarme a alzar la voz, ser resiliente y perseverante en los diferentes momentos de mi vida, sin duda, el nunca darme por vencida ha sido por su ejemplo, a mi **papá** por confiar siempre en mi poder de decisión, por enseñarme que obtener lo que se quiere es producto de esfuerzo, constancia y trabajo, a ambos por ser mi mayor ejemplo de valentía y compromiso; este logro, en definitiva, es por y para ustedes. A **mis hermanas**, Dayan y Gabriela Ivonne, por ser mi hogar y el significado más grande que tengo de “familia”, por cada momento que llenó mi corazón en los instantes más difíciles de mi vida y por compartirme parte de la colosal fuerza que tienen, ustedes y mis sobrinxs son el amor de mi vida; a **Gabriel** por regalarme la herramienta con la que inicié y terminé ésta aventura, a **Hugo y Nayeli** por abrirme las puertas de su casa en los semestres donde trayectos tan largos habrían consumido mi tiempo y energía, y a mis **tíos**, Antonia y José Luis, por su lealtad y demostración de cariño constante.

A mis **amigas**, Erika, Sarai y Dulce, por compartir tantos días llenos de risas, estrés, estudio y dedicación, hicieron los últimos dos años de la carrera inigualables. A **Samantha**, mi mejor amiga, que aunque nuestros caminos profesionales nos quitaron el privilegio de vernos diario, no hubo un día en el que su amistad no me reconfortara; a **Gibrán** por la nueva y cálida amistad, a la **SONACIFO: Geraldine** por lo empoderada y orgullosa que me hace sentir su amistad, Alejo por lo audaz y visionaria que es la vida a su lado, Diego por la paciencia y el cariño que sabemos es mutuo e Isaac por la sensatez y la alegría que nos transmite siempre, a ustedes mi gran equipo de trabajo, por poner empeño y constancia en crear nuevos espacios para científicos y científicas forenses, estamos empezando y lo estamos haciendo juntos.

A **Isaac**, mi mejor amigo y mi compañero de todos los días, por su paciencia desde que nuestra amistad inició, por su compañía presencial y a la distancia en las noches donde las videollamadas eran solo para vernos trabajar, por su comprensión, ayuda, amor y amistad incondicional, por ser un lugar seguro en los instantes de duda e inseguridad, y por estar presente en todo momento desde el inicio de este proyecto, por celebrar y disfrutar cada uno de mis logros desde entonces, por impulsarme a luchar por lo que quiero y especialmente, por compartirte conmigo, siempre. Gracias por cada palabra de aliento, cada sonrisa, cada abrazo y cada demostración de afecto que me llenaron de motivación, no habría querido vivir todo este proceso sin ti. Expreso mi más significativo agradecimiento por ser mi compañero de normas APA, por prestarme tu dedo pulgar para ser parte de las imágenes de ésta tesis, y por haber sido el fotógrafo de la huella latente que está plasmada desde ahora, y para siempre aquí. Pero sobre todas las cosas, gracias por querer día a día seguir compartiendo tu vida conmigo.

Durante el tiempo que llevo de vida siempre me he jactado de decir que he tenido suerte, no por las oportunidades que con esfuerzo y constancia he obtenido, sino por las personas con las que he tenido la fortuna de coincidir, a Ricardo, Silvia, Chayito, Veredín, Daniela y a todas aquellas que han iluminado mi camino con un mensaje, una sonrisa o un cálido apapacho, gracias totales, son parte de mi más valioso tesoro.

Financiamiento

Este proyecto fue beneficiado por el Proyecto de Desarrollo científico para atender problemas nacionales *PN-2016-01-2018* con el título “Proyecto NN: protocolos de identificación humana, colección osteológica nacional y base de datos de personas no identificadas y/o desaparecidas” y del proyecto *PAPIME PE-2014-21* con el título “Propuesta didáctica interactiva para la identificación humana a través del análisis comparativo de patrones morfológicos en dactiloscopia y odontología forense”.

INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
JUSTIFICACIÓN	7
HIPÓTESIS	8
OBJETIVOS	8
MARCO TEÓRICO	9
<u>DACTILOSCOPIA</u>	9
<i>Generalidades de la dactiloscopía</i>	9
<i>Patrones y clasificaciones de las impresiones dactilares</i>	12
<i>Metodología ACEV</i>	19
<u>BIOMETRÍA</u>	24
<i>Generalidades de la biometría</i>	24
<i>Biometría dactilar y la Ciencia Forense</i>	27
<i>Bases de datos biométricas dactilares: un contexto internacional y mexicano</i>	31
<u>CARACTERIZACIÓN POBLACIONAL A PARTIR DE HUELLAS DACTILARES</u>	36
<i>Perspectiva antropológica</i>	36
<i>Perspectiva dactiloscópica y dactiloscopológica</i>	38
<i>Sinergia de la perspectiva antropológica y dactiloscópica: su impacto en la identificación humana</i>	41
<u>PRUEBAS ESTADÍSTICAS EN EL ANÁLISIS DE HUELLAS DACTILARES</u>	44
<i>Error intraobservador</i>	47
<i>Estadística descriptiva y multivariante</i>	51
METODOLOGÍA	60
RESULTADOS	68
DISCUSIÓN	121
<i>Error intraobservador en la dactiloscopía</i>	122
<i>Caracterización de la variabilidad dermatoglífica de biométricos dactilares</i>	126
<i>Aplicación del “Protocolo de análisis de impresiones dactilares” y las bases de datos de biométricos dactilares</i>	140
CONCLUSIONES	145
REFERENCIAS	149
ANEXO	163

INTRODUCCIÓN

*“Ni la muerte, ni la fatalidad, ni la ansiedad,
pueden producir la insostenible desesperación
que resulta de perder la propia identidad “.*
- H.P. Lovecraft

Existe en México una creciente crisis forense en materia de identificación humana, derivado de ella se han visibilizado una serie de problemáticas que atañen a los servicios forenses del país, las cuáles van desde protocolos de trabajo deficientes y poco trabajo interdisciplinario, hasta la existencia de bases de datos subutilizadas y escasamente interconectadas; diversas organizaciones e instituciones han emitido una serie de recomendaciones en atención a éstas problemáticas, siendo de principal interés para ésta investigación el desarrollo de protocolos para todas las disciplinas intervinientes en los dictámenes de identificación (MNDM, 2021). Para poder atender las necesidades de la crisis forense y coadyuvar en la búsqueda de soluciones específicamente desde el área de la identificación de personas, es de suma importancia tener claros aspectos básicos que ayuden a comprender el alcance, por ejemplo, ¿qué es la identidad?, ¿qué abarcan los procesos de identificación?, ¿en dónde estamos desde la perspectiva de la ciencia forense? y ¿hacia dónde vamos?

La identidad es todo aquello que hace que un individuo sea definible y reconocible, en términos de poseer un conjunto de cualidades o características que lo distinguen de otros sujetos. La identificación, por lo tanto, es el acto de establecer una identidad (Thompson, T., Black, S., 2007) a partir de la comparación y verificación de dichas características. Son diversas las ciencias y disciplinas que se utilizan para establecer con un alto grado de certeza la identidad de una persona, entre ellas se encuentran la genética, la odontología y la antropología forense, así como la dactiloscopia y lofoscopia (CNB, 2020).

Independientemente del Método de Comparación de Características (MCC) que se utilice para la identificación, los resultados de los análisis tienden a darse en términos de conclusiones positivas, negativas o no concluyentes; de acuerdo con el *President's Council*

of Advisors on Science and Technology (PCAST) en su reporte “Forensic Science in Criminal Courts: Ensuring Scientific Validity of Feature-Comparison Methods” establece que para que un MCC sea científicamente válido, se deben mostrar los procedimientos que lo componen, los cuáles deben estar basados en estudios empíricos que sustenten su repetitividad, reproducibilidad, confiabilidad y precisión (PCAST, 2016).

Todos los seres humanos cuentan con caracteres biológicos que son material de estudio en el proceso de identificación, los cuáles pueden clasificarse en dos grupos, el primero corresponde a aquellos que se adquieren a lo largo de la vida y el segundo a aquellos que se forman completamente desde la etapa embrionaria hasta el nacimiento y que permanecen inherentes al cuerpo humano a lo largo del tiempo; es importante mencionar que los caracteres biológicos inherentes no son estáticos, sino que crecen y se alteran con el tiempo o con la introducción de diferentes ambientes o estímulos (Thompson, T., Black, S., 2007), sin embargo, dentro del proceso de identificación se considera que algunas propiedades específicas de dichos caracteres son útiles para estudio aún cuando éstas son expuestas a condiciones que puedan modificar parcialmente su configuración original. En la presente investigación se plantea como material de estudio las huellas dactilares, las cuáles son consideradas como caracteres inherentes al iniciar su formación desde la séptima u octava semana de gestación, terminando su maduración alrededor de las 16 semanas (Champod, C., et. al., 2004 y Maceo, 2011) y conservando la permanencia de su patrón morfológico durante la vida del individuo hasta etapas tempranas de descomposición, siempre que el tejido blando que conforma la dermis no esté degradado.

Derivado de su practicidad en lo que respecta al tiempo, recursos y precisión del estudio de huellas dactilares, aunado a su sustento en los principios de perennidad, inmutabilidad, diversidad y clasificabilidad (Trujillo, 2007; Vucetich, 1904), la dactiloscopía se ha convertido en una de las disciplinas forenses más utilizadas a lo largo de la historia para establecer la identidad en personas (Barnes, 2011). Las huellas dactilares son impresiones que se forman a partir de la superficie desigual de la piel de los dedos de la mano, en donde se identifican crestas, surcos y poros (Hamilton, 2013). Dentro del proceso de identificación, los elementos de estudio que destacan son los tipos fundamentales, las minucias o puntos

característicos y los poros (Ashbaugh, 1999), las diferentes combinaciones aleatorias que surgen a partir de la ubicación y dirección de éstos elementos generan un patrón único que, en conjunto, permite definir la individualidad de la huella dactilar (Ashbaugh, 1999 y Pankanti et. al., 2002).

El uso de huellas dactilares como elementos identificativos se ha extendido actualmente a diversas áreas, un claro ejemplo es la biometría donde se reconoce a los datos biométricos como las propiedades físicas, fisiológicas, de comportamiento o rasgos de la personalidad atribuibles a una sola persona y que son medibles (INTAIPD, 2018); cuando una huella dactilar se posiciona y captura a través de un escáner biométrico se le conoce como huella digital. La relevancia de la biometría dactilar en la sociedad moderna se ha visto impulsada por la necesidad de sistemas de gestión de identidad (Jain, et. al., 2008) dentro del contexto de varias aplicaciones, por ejemplo, en temas de seguridad nacional, seguridad privada, comercio electrónico, acceso a dispositivos digitales y documentos de identificación oficial (INTAIPD, 2018); lo que ocasiona una amplia cantidad de huellas digitales almacenadas en bases de datos que resguardan las instituciones correspondientes.

En México, se tienen antecedentes de bases de datos de biométricos dactilares de Instituciones con funciones electorales, económicas, de salubridad, educativas y financieras, entre las que se encuentran: el Instituto Nacional Electoral (INE), Sistema de Administración Tributaria (SAT), Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), Universidades y Bancos, respectivamente; recientemente se ha retomado la iniciativa de la "Cédula Única de Identidad Nacional" a cargo del Registro Nacional de Población (RENAPO), la cual contendrá la información de datos sensibles personales como son los datos biométricos, y conjuntará información hoy dispersa en diversos instrumentos usados para la identificación de personas, como pasaporte, credencial del INE, la cédula profesional, entre otros (Senado de la República, 2009 y RENAPO, 2021). Bases de datos como las mencionadas han sido creadas, en esencia, con fines de prever y garantizar el derecho a la identidad en México, sin embargo, su impulso simboliza un precedente más para la creación de bases mexicanas de datos biométricos que puedan ser utilizadas en el ámbito forense, desencadenando para la

dactiloscopía nuevos retos de innovación científica, que van desde mejoras en la coordinación interinstitucional hasta el desarrollo de investigaciones de corte poblacional.

Claro está que la huella dactilar es uno de los caracteres biológicos presentes en cualquier documento de identificación; las bases de datos de biométricos dactilares que se generan son para fines propios y específicos de cada institución por lo que los lineamientos de recopilación, sistematización, almacenamiento, intercambio y resguardo de información dependen de cada una de ellas (García, 2020). Concentrar información biométrica y biográfica a nivel poblacional representa grandes retos, entre ellos la responsabilidad de adoptar medidas administrativas, físicas y técnicas para su resguardo y protección, con especial énfasis en el intercambio interinstitucional de datos sensibles personales, lo cual es de suma importancia para la atención de la crisis forense de nuestro país en materia de identificación de personas.

Es evidente que las huellas dactilares son un elemento identificativo de principal atención, tanto, que son numerosas las investigaciones enfocadas al estudio de las variaciones dermatoglíficas en poblaciones humanas (Eshak, 2013; Gutiérrez-Redomero et al., 2007, 2011, 2012, 2013; Karmakar, 2006; Kaur y Garg, 2011 y Rivaldería et al., 2017), dentro de las cuáles, se busca cuantificar la variabilidad biológica de ciertas características como las minucias y los tipos fundamentales; los resultados de caracterizar a una población impactan en diversas áreas, por ejemplo, en la antropología al permitir conocer las diferencias entre la frecuencia de dichas características en distintas poblaciones del mundo, y desde la dactiloscopía, para obtener estándares numéricos propios de la población estudiada, mismos que sean generados a partir de metodologías validadas (PCAST, 2016) que reduzcan el factor de la apreciación humana y que a su vez forjen una base sólida para el proceso de identificación, es por ello que, con la implementación de la biometría dactilar en el contexto actual de nuestro país y dada la creciente cifra de personas sin identificar, resulta interesante la idea de explorar el impacto de la sinergia entre los parámetros poblacionales y de identificación de personas.

Como se ha descrito, México cuenta con una gran cantidad de bases de datos de biométricos dactilares que, desde la perspectiva dactiloscópica y a partir de metodologías basadas en evidencia, podrían ser utilizadas para conocer la variabilidad dermatoglífica de nuestro país y con ello contribuir a la generación de parámetros dactilares aplicables que impacten directamente los procesos de identificación de personas en el ámbito forense, así como al desarrollo de sustento estadístico que otorgue mayor peso de la evidencia de las huellas dactilares. Por tal motivo, en el presente trabajo se hará énfasis en el análisis de bases de datos de biométricos dactilares, realizando una evaluación estadística de las características dermatoglíficas en una muestra de población mexicana.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una de las violencias multifactoriales y estructurales más presente en México desde hace ya varios años es la desaparición de personas, las cifras de su prevalencia han ido en aumento a lo largo de éstas últimas décadas, desencadenando una problemática humanitaria, la llamada crisis forense. De acuerdo con el Registro Nacional de Personas Desaparecidas, al 16 de mayo de 2022, en México existen 100,000 personas registradas como desaparecidas o no localizadas (Turati et. al, 2022), y se tiene conocimiento que al menos existen casi 52 mil cuerpos sin identificar (MNDM, 2021). En este contexto, crear bases de datos de biométricos dactilares interoperables es una problemática que debe ser atendida con fines de favorecer el intercambio de información, sin embargo, el auge de su aplicación no sólo abarca y compete el cumplimiento y resguardo del derecho humano a la identidad, su establecimiento deja una nueva visión. Específicamente en el marco de las huellas dactilares, el estudio de bases biométricas permite conocer la frecuencia, distribución y variabilidad de las características dermatoglíficas más relevantes en diferentes poblaciones humanas, tal como lo establecen algunos estudios internacionales como los de Gutiérrez-Redomero., et al. (2011) y Rivaldería, et al. (2017). En el panorama mexicano son incipientes las investigaciones al respecto, existiendo los antecedentes de Muñoz (2018) y García Cuevas (2018) las cuales presentan un enfoque exclusivo en impresiones dactilares convencionales y no en registros biométricos.

Para poder hacer uso de la dactiloscopia, no sólo resulta indispensable la existencia de bases de datos, sino también y de mayor relevancia, el análisis científico de los patrones dactilares ya que, como se ha visibilizado anteriormente, en México se tienen dos principales problemáticas, la primera es que las instituciones cuentan con una gran cantidad de bases de datos que no son analizados, de los cuáles se podría obtener información que permita caracterizar a la población y con ello promover la obtención de resultados basados en evidencia que impacten directamente los procesos de identificación forense. La segunda problemática surge al existir registros independientes de diferentes instituciones sin un requisito de compatibilidad del formato, esto con respecto a la estandarización técnica del registro de huellas digitales y a la instrumentación utilizada para ello, tal como lo refleja el

Dr. García Ricci en su trabajo *Privacidad e identificación forense de Personas Desaparecidas: análisis jurídico sobre el intercambio de datos personales con fines de identificación humana* en donde derivado de diversas entrevistas obtiene testimonios que evidencian que "entre estados, no se tienen los mismos parámetros de registro y aunque intercambien información, ésta no es comparable entre sí", esto desencadenando factores que pueden dificultar el análisis forense de la huella en cuestión y el acceso interinstitucional para compartir bases de datos, como lo acontecido en el 2016 con la iniciativa para atender la crisis forense referente a personas desaparecidas y el convenio para el intercambio de información biométrica bajo términos de confidencialidad (FGR, 2016).

JUSTIFICACIÓN

El proyecto que se presenta nace de la evaluación crítica del uso de biométricos dactilares en nuestro país, de la necesidad de estandarizar las técnicas aplicadas al análisis de las huellas digitales y de la inquietud por realizar investigaciones básicas que otorguen a la dactiloscopía las herramientas necesarias para reforzar la validez y fiabilidad de sus resultados. La elaboración de esta investigación es importante ya que el producto de esta, busca describir y caracterizar la variabilidad dermatoglífica en población mexicana, esto a partir de elementos identificativos de uso común como son actualmente los biométricos dactilares. Así mismo, se pretende coadyuvar al análisis de huellas digitales desde el establecimiento de criterios que permitan homologar parámetros institucionales y la generación de propuestas de análisis que asistan en el actuar del perito en dactiloscopía en contextos forenses reales.

HIPÓTESIS

1. Una huella plana o de apoyo contiene información relevante para la identificación de una persona, por lo que características como el tipo fundamental y las minucias permitirán obtener datos sobre diversidad de la variabilidad dermatoglífica de una muestra poblacional.
2. Existen diferencias estadísticamente significativas en la distribución de los tipos de minucias respecto al tipo fundamental, al sector anatómico dactilar y al sexo.

OBJETIVOS

El objetivo general es caracterizar la variabilidad dermatoglífica de registros biométricos dactilares en población mexicana contemporánea, para lo cual se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Calcular el error intraobservador al aplicar la metodología modificada en una muestra de biométricos dactilares.
2. Identificar a partir de análisis estadísticos, la distribución frecuencial de tipo fundamental y la variabilidad del tipo de minucia con respecto al patrón morfológico, al sexo y al sector anatómico dactilar.
3. Generar recomendaciones para el “Protocolo de análisis de impresiones dactilares” del Laboratorio de Antropología y Odontología Forense (LAOF), enfocadas al estudio de biométricos dactilares de apoyo, con fines de identificación forense.

MARCO TEÓRICO

DACTILOSCOPIA

Generalidades de la dactiloscopía

La dactiloscopía es la ciencia encargada del estudio de los dibujos que se encuentran en las zonas de piel de fricción del ser humano. Se divide en tres grandes ramas: dactiloscopía (pulpejos de los dedos), quiroscopía (palmas de las manos) y pelmatoscopía (plantas de los pies) (FGR, 2021). Siendo la primera rama la disciplina que se encarga del análisis de la forma, disposición, registro y clasificación de las crestas papilares o de fricción de las falanges distales de los dedos de la mano (Pérez, 2020) en contextos forenses.

Como vocablos derivados de *Dactiloscopía* se encuentran: 1. Dactilógrafo, persona encargada de tomar las impresiones de las huellas. 2. Dactiloscopista, experto o experta en la clasificación, archivo y búsqueda de dactilogramas. 3. Dactiloscopólogo(a), quienes con fines científicos o prácticos profundizan en el estudio de la dactiloscopía. 4. Dactilograma, conjunto de líneas papilares del pulpejo digital y al dibujo que éstas pueden imprimir (de Antón y Barberá, 2017); los cuáles pueden ser divididos en 1) natural - los que pueden observarse en las yemas de los dedos, 2) artificial - los que se obtienen al imprimirlos sobre una superficie previo el entintado, y 3) latente - aquel patrón que no se observa a simple vista por lo que requiere reveladores físicos o químicos para ponerle manifiesto (Trujillo, 2019 y de Antón y Barberá, 2017).

Dentro del ámbito profesional se han utilizado indiscriminadamente algunos términos de uso común, por ejemplo: huella dactilar, huella digital, impresión dactilar y biométrico dactilar; para poder encaminarnos a una praxis basada en una terminología clara, hay que comprender que los dedos de la manos presentan de manera natural dibujos de crestas de fricción, cuando éstas son entintadas a propósito, con algún material colorante a fin de ser plasmadas en una superficie se le conoce como impresión dactilar, por lo contrario, si éstas son dejadas de manera accidental quedando generalmente en un estado latente, se le denomina como huella dactilar (de Antón y Barberá, 2017), cuando la impresión es capturada en un dispositivo o

escáner digital se le conoce como huella digital, la cual puede ser ingresada a un sistema de búsqueda y reconocimiento a fin de ser comparada de manera manual o automatizada con bases de datos conocidas y así verificar la identidad de una persona; cuando la huella digital es procesada de esta manera y para dichos fines se le denomina biométrico dactilar (INTAIPD, 2018, y Gold, 2013; Ver Imagen 1).

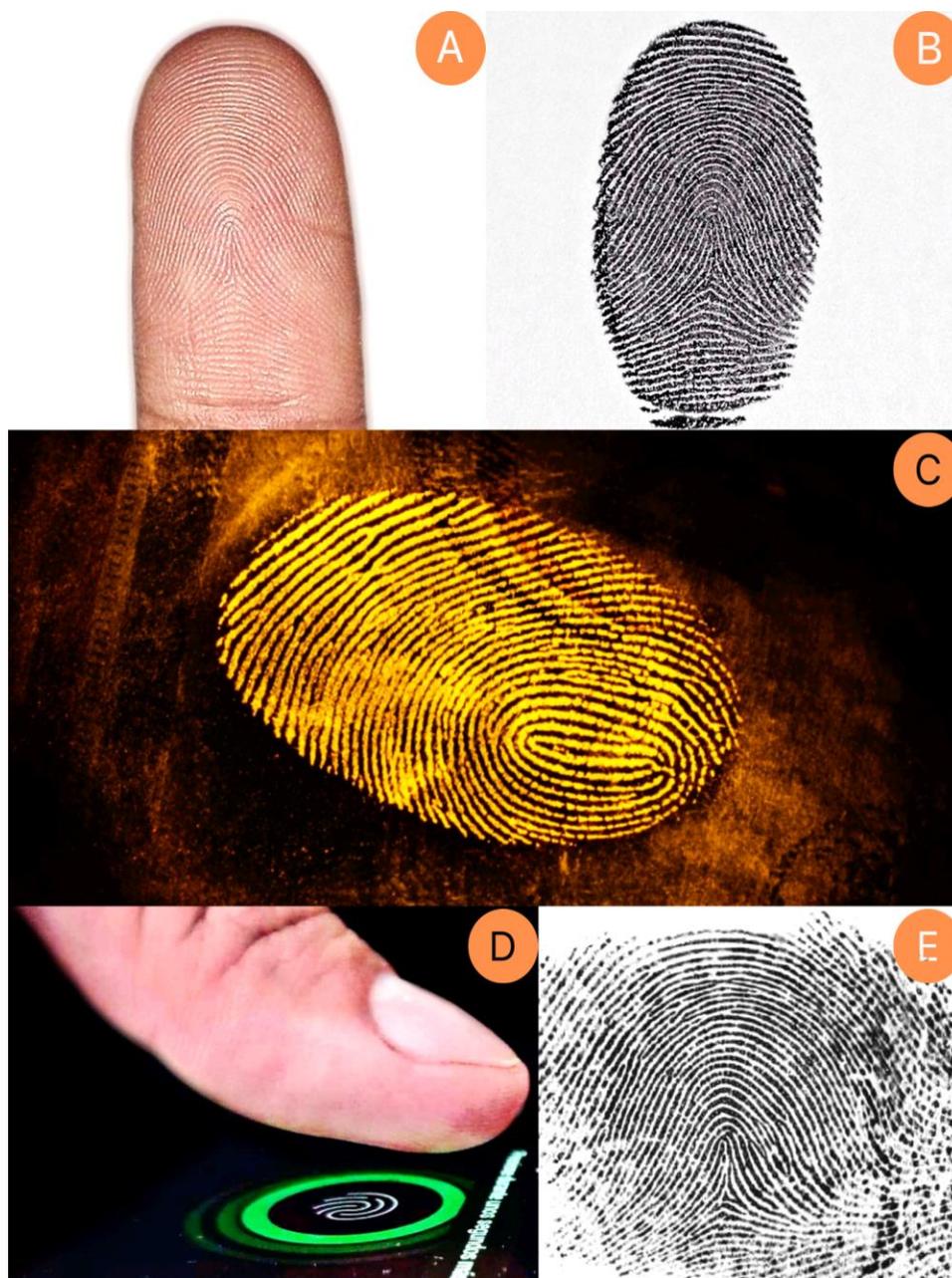


Imagen 1. Ejemplos de a) huella natural, b) impresión dactilar, c) huella dactilar, d) huella digital y e) biométrico dactilar.

Existen dos tipos de impresiones dactilares, las planas o de apoyo y las rodadas como se muestran en Imagen 2, éstas últimas corresponden a aquellas huellas que se toman a partir de un movimiento giratorio que va desde un extremo lateral del dedo hasta el otro, mientras que las lisas o planas se imprimen por contacto (sin ninguna rotación) haciendo una ligera presión sobre la superficie (FGR, 2021). Un aspecto a considerar en cualquier impresión dactilar es que, entre más completo se observe el dactilograma -como en las rodadas- se tendrá una mayor cantidad de características para atribuir la identidad de una persona, sin embargo, ésta premisa no excluye que otro tipo de impresiones puedan ser útiles para su estudio, porque si bien es cierto que las impresiones planas y los fragmentos sólo contienen información parcial de la huella, todas las impresiones deben ser evaluadas en términos de claridad y cantidad de información antes de iniciar un análisis. De éstos últimos aspectos se hablará con mayor detalle más adelante.

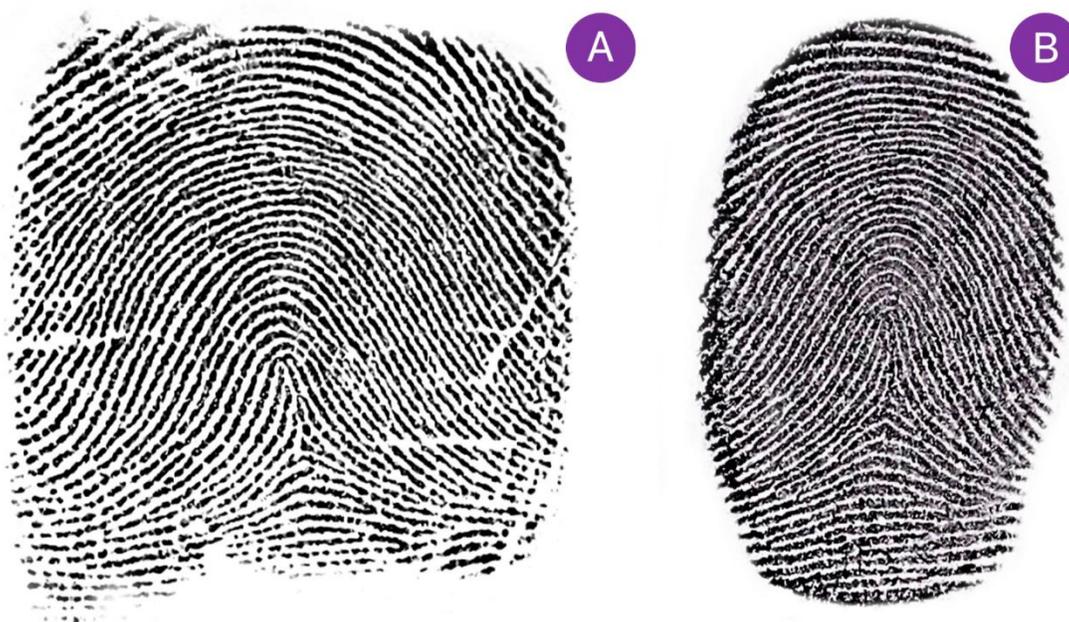


Imagen 2. Ejemplo de a) impresión rodada e b) impresión plana o de apoyo.

Derivado de su practicidad en lo que respecta al tiempo, recursos y precisión del estudio, la dactiloscopía se ha convertido en una de las herramientas más utilizadas a lo largo de la historia para establecer la identidad humana (Barnes, 2011), ya sea en personas vivas o en cadáveres durante las primeras etapas de descomposición. Los principios por los cuáles se

sustenta el uso de las huellas dactilares como carácter biológico de identificación devienen de características innatas a ellas (Ashbaugh, 1999, Trujillo, 2007., Champod, C., et. al., 2004. Vucetich, 1904. y de Antón y Barberá, 2017), como:

- Perennidad: al formarse completamente desde la sexta semana de gestación y permanecer sin cambios durante toda la vida hasta la descomposición del cadáver (Ashbaugh, 1999).
- Inmutabilidad: al mantener su forma a pesar de las modificaciones que puedan sufrir, sean voluntarias o no; puntualizando que aquellas cicatrices producto de lesiones también constituyen un elemento identificativo (Trujillo, 2007).
- Diversidad: debido a la variabilidad de patrones posibles no hay una huella que en sus detalles minuciosos sea igual a otra (Ashbaugh, 1999).
- Clasificabilidad: Las características generales del patrón permiten clasificar las impresiones, facilitando su análisis (Ashbaugh, 1999).

Patrones y clasificaciones de las impresiones dactilares

Las huellas dactilares son impresiones que se forman a partir de la superficie desigual de la piel de los dedos de la mano, en donde se identifican diversas protuberancias y hendiduras conocidas como crestas y surcos respectivamente (INTAIPD, 2018). Cada cresta contiene poros por los que se secretan sustancias como agua y sudor, esto facilita que, el dedo al tener contacto con una superficie deje una impresión del patrón de la cresta de fricción (Hamilton, 2013). Las crestas, los surcos y los poros son la base estructural de la huella dactilar (ver Imagen 3); su conformación genera elementos de estudio para la identificación, dentro de los que destacan los patrones morfológicos del flujo general de las crestas llamados tipos fundamentales y las minucias o puntos característicos que se definen como aquellas particularidades que presentan las trayectorias de las crestas en relación a la secuencia, longitud y camino que siguen desde su inicio hasta su fin (Ashbaugh, 1999; Galton, 1892 en Loyzance, 2017 y Vucetich, 1904).

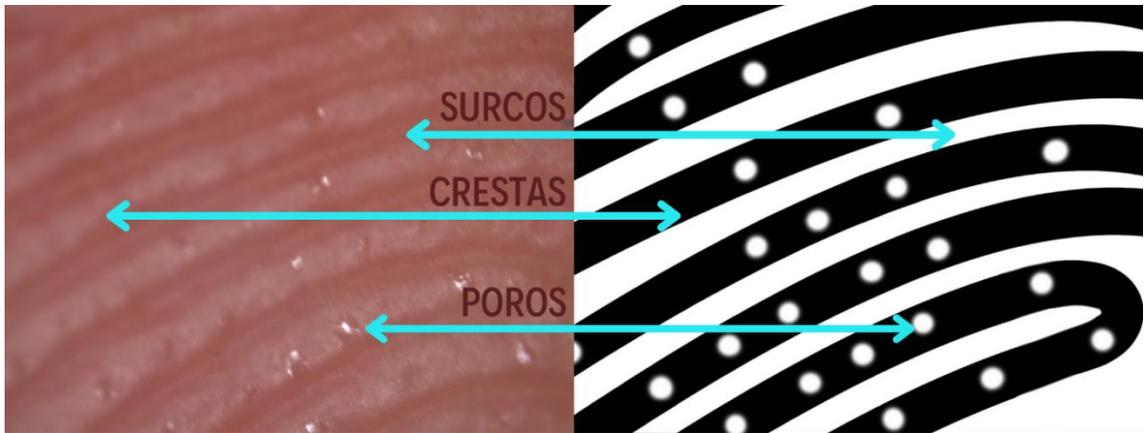


Imagen 3. Correspondencia de poros, crestas y surcos. Fotografía original del LAOF.

Para su estudio, los dactilogramas son divididos en sistemas crestaes como se muestran en la Imagen 4, éstos corresponden a los diferentes agrupamientos que presentan las crestas de fricción en función de su ubicación, forma y dirección general en una región determinada del dactilograma, dicha agrupación parte de la base, el centro y el margen de la impresión, por lo que los sistemas crestaes se dividen en tres: sistema basilar, sistema nuclear y sistema marginal, respectivamente (Trujillo, 2007).

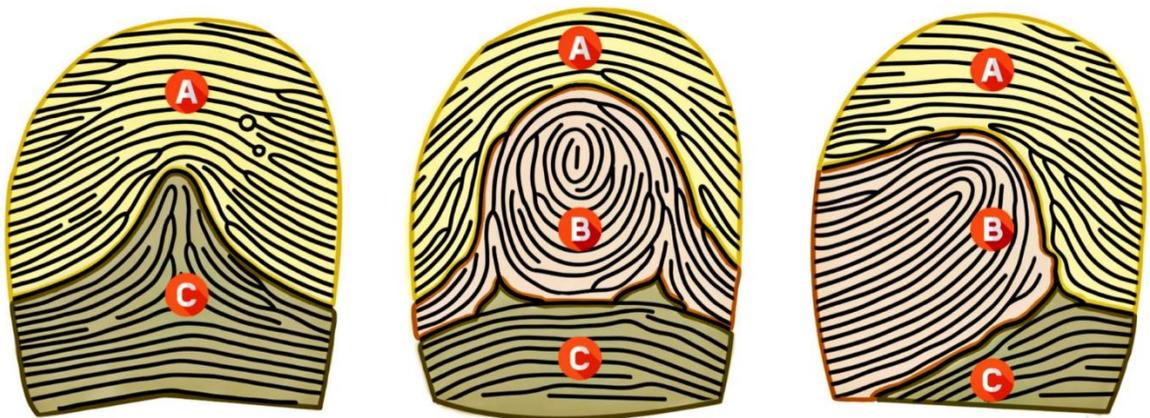


Imagen 4. Tipos fundamentales con sus respectivos sistemas crestaes - a) sistema marginal, b) sistema nuclear y c) sistema basilar-.

Cómo se mencionó, uno de los elementos de estudio de las impresiones dactilares son los tipos fundamentales, al constituir el patrón general de la huella estos no representan un elemento exclusivo de cada persona, por lo que son considerados como características de clase, es decir, se clasifican dentro de aquellos rasgos que colocan a un individuo u objeto en

un grupo o categoría (Moses, 2019); cuando se realiza una comparación de muchas impresiones dactilares para determinar si alguna pertenece o no a la de un individuo, éstas características de clase son de utilidad para reducir el universo potencial de candidatos que pueden ser la fuente de origen de la huella (Moses, 2019).

A medida que las crestas de fricción recorren la superficie de los dedos de la mano forman diferentes patrones, que derivado de la variedad de morfologías se han clasificado en tipos y subtipos fundamentales, cuyo agrupamiento dependerá del sistema de clasificación de huellas dactilares que se utilice. Algunos patrones se presentan con mayor frecuencia en la población, entre los más comunes se encuentran las presillas, cuyas crestas entran y salen por un mismo lado del dedo, dando vuelta en U alrededor del núcleo; seguido de los verticilos, que forman circuitos circulares completos alrededor del punto central del dactilograma; y por último, los arcos cuyas crestas entran por un lado de la huella, hacen una elevación en el centro y salen del lado contrario (Ver Imagen 5). Existen variaciones de cada uno de éstos patrones generales como se presentan en la Imagen 6, que pueden identificarse como subtipos, tal es el caso del verticilo de doble bucle, verticilo de bucle de bolsillo central, arco liso y arco capa, por mencionar algunos (Moses, 2019).

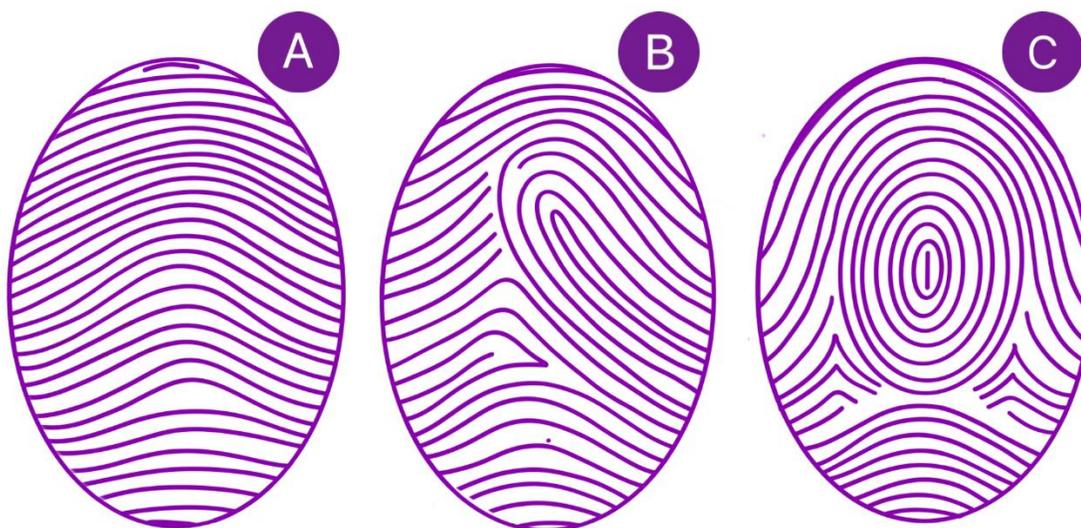


Imagen 5. Tipos fundamentales con mayor frecuencia: a) Arco, b) Presilla, y c) Verticilo.

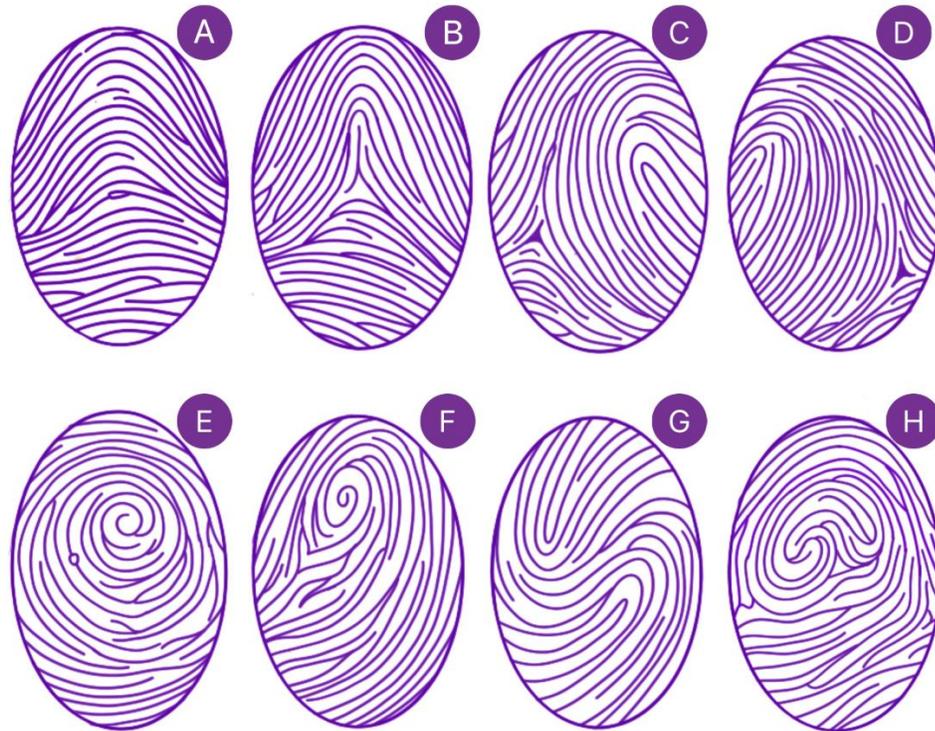


Imagen 6. Subtipos de tipos fundamentales: a) Arco liso, b) Arco tendido, c) Presilla externa, d) Presilla interna, e) Verticilo plano, f) Verticilo de bucle de bolsillo central, g) Verticilo de doble bucle, y h) Verticilo accidental.

Para la clasificación y descripción de los tipos fundamentales se considera la presencia o ausencia de un elemento característico presente en la mayoría de las impresiones dactilares llamado *delta* (ver Imagen 7), el cual se define como un área de la piel de las crestas de fricción donde las trayectorias de las líneas fluyen en tres direcciones diferentes, que al juntarse crean un patrón triangular (Moses, 2019, Trujillo, 2007 y Ashbaugh, 1999).



Imagen 7. Delta en a) Presilla, b) Arco y c) Verticilo.

Derivado de la variabilidad de patrones que pueden existir, se han desarrollado diversos sistemas de clasificación para los tipos fundamentales, uno de ellos es el Sistema Vucetich (Vucetich, 1904; Hutchins, 2011, Trujillo, 2007) el cuál continúa vigente en los Servicios Periciales de México. Éste sistema agrupa las impresiones dactilares en cuatro tipos (ver Imagen 8):

- *Arcos*: Dibujos formados por curvas que carecen de deltas y núcleo. Está formado por el sistema basilar y marginal (Moses, 2019 y Trujillo, 2007).
- *Presillas internas*: El flujo general de crestas nace del lado izquierdo haciendo su trayectoria a la derecha del dactilograma recubriendo el núcleo para después salir por el mismo punto de partida. Este tipo presenta solo un delta situado a la derecha del dactiloscopista (Trujillo, 2007).
- *Presillas externas*: El flujo general de crestas nace del lado derecho haciendo su trayectoria a la izquierda del dactilograma y recubriendo el núcleo para después salir por el mismo punto de partida. Este tipo presenta solo un delta situado a la izquierda del observador (Trujillo, 2007).
- *Verticilos*: Al menos dos deltas situados uno a cada lado, sus crestas adoptan diferentes formaciones como son espirales, círculos concéntricos, ovoides, sinuosos, entre otros (Moses, 2019 y Trujillo, 2007).

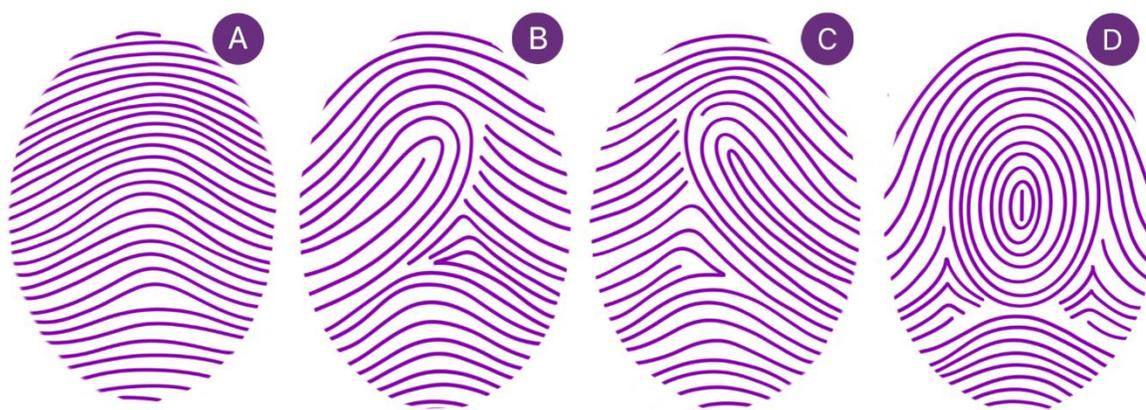


Imagen 8. Tipos fundamentales según la clasificación del Sistema Vucetich: a) Arco, b) Presilla interna, c) Presilla externa, y d) Verticilo.

Otro de los elementos de estudio en las impresiones dactilares son las minucias, éstas son el resultado de la formación de nuevas crestas, posterior al periodo de formación inicial de las crestas primarias. El patrón que adoptan las minucias depende de factores biológicos como la forma, tiempo, simetría y tamaño de estructuras embrionarias que son de principal importancia en el desarrollo de las crestas de fricción, como lo es la almohadilla volar (Bonnievie 1924; Cummins 1926; Penrose 1973). Cuando en un dactilograma se realiza la búsqueda y localización de minucias, se debe reportar, entre otras cosas, el tipo y su posición relativa; la configuración resultante otorga información selectiva de gran importancia para el proceso de identificación (Champod et. al., 2004), por lo anterior, las minucias son consideradas características de subclase, es decir que individualizan al ser exclusivas de una persona o cosa (Moses, 2019; Kaye, 2010).

Son diversas las trayectorias que puede seguir una cresta de fricción en particular, como resultado se tiene una amplia variabilidad de minucias, algunas se presentan con mayor frecuencia en la población (Moses, 2019), por ejemplo, las cortadas que se identifican como el final de una cresta, las bifurcaciones donde una cresta se divide y continúa su trayecto, y los puntos que se definen como una unidad de cresta (Ashbaugh, 1999). Existen otros tipos de minucias de menor frecuencia que son seleccionados dependiendo del tipo de clasificación de huellas dactilares que se esté usando; en el ámbito nacional, el Sistema Vucetich (Vucetich, 1904) considera cinco: cortadas, bifurcaciones, islotes, horquillas y encierros (ver Imagen 9); en otros países se contempla una mayor cantidad, dentro de las que destacan: interrupciones, puntos inter e intra-crestales, empalmes, trifurcaciones, secantes, entre otras, como se muestra en la Imagen 9 (Gutiérrez et al., 2011).

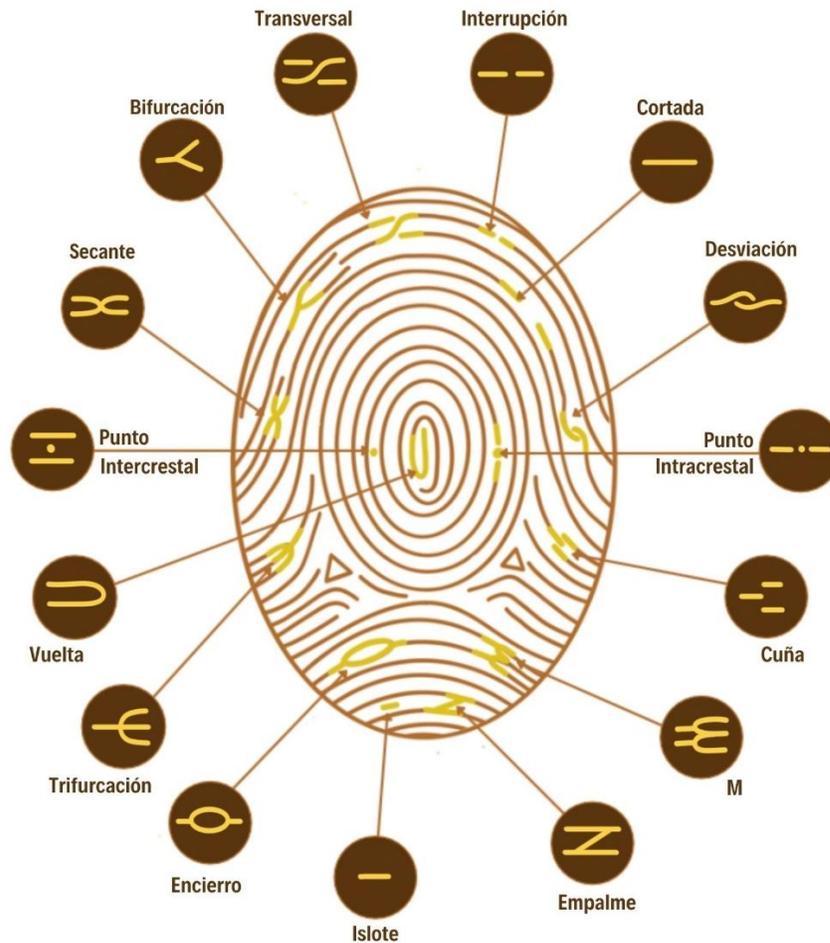


Imagen 9. Tipología de minucias o puntos característicos.

Sobre el estudio de las minucias es importante precisar dos aspectos, el primero es que las definiciones que se encuentran reportadas en la bibliografía son generales y ambiguas, situación que puede generar problemática para él o la dactiloscopista y/o dactiloscopóloga al encontrarse con impresiones que no sean claras y que como consecuencia conlleven la identificación de “falsas minucias”, por lo que tener claras las diferencias puntuales entre unos tipos y otros resulta de vital importancia al momento de establecer una identidad. El segundo aspecto refiere a la preferencia de cuántas y cuáles minucias utilizar en un estudio; en el ámbito de la identificación forense no se tiene una estandarización mundial de esto, ya que cada país toma arbitrariamente ésta decisión; dentro del ámbito académico sucede lo mismo, el o la dactiloscopóloga es quién, en función del objetivo y enfoque su investigación, determina que minucias analizar.

Existen características naturales y temporales de la huella natural que pueden visualizarse en las impresiones dactilares, éstas características influyen en la identificación de falsas minucias debido a que interrumpen el flujo de las crestas de fricción en diferentes direcciones; en consideración a que no son perennes, ni inmutables y que cambian de posición y de longitud de manera aleatoria para luego desaparecer por completo, no deben ser consideradas con valor identificativo, éstas características son conocidas como “líneas blancas” (Ashbaugh, 1999) o “líneas albudactilares” (ver Imagen 10) (Trujillo, 2007).



Imagen 10. Líneas albudactilares.

Cómo se ha descrito, la trayectoria de las crestas ya sea en su flujo general o particular no es continua (Hamilton, 2013), las infinitas combinaciones que surgen aleatoriamente a partir de la ubicación y dirección de los elementos de estudio antes descritos generan un patrón único que, en conjunto, permite definir la individualidad de la huella dactilar (Ashbaugh, 1999 y Pankanti et. al., 2002) y con ello, posicionarla como un carácter biológico principal cuando de identificar a una persona se trate, hasta ahora se han descrito a detalle las características que permiten llegar a una conclusión en un estudio dactiloscópico, sin embargo, no se ha dicho aún cómo se realiza el proceso de identificación a partir de huellas dactilares y los factores que influyen en el mismo. Dichos aspectos se detallan a continuación.

Metodología ACEV

Como se mencionó en la introducción, para que las conclusiones de los estudios en materia de identificación humana tengan validez científica, los procedimientos que se utilizan para llegar a ellas, deben estar basados en estudios empíricos que sustenten su repetibilidad,

reproducibilidad, confiabilidad y precisión (PCAST, 2016), a su vez, con la incorporación de los criterios de Daubert -elementos que debe cumplir una prueba o ciencia para ser considerada confiable ante un juzgado- se elevó el escrutinio científico de las ciencias y disciplinas forenses que tienen como principio algún Método de Comparación de Características (MCC), entre ellas, la dactiloscopía (Loyzance, 2017; Gianelli, 2006).

El proceso de identificación por huellas dactilares parte de dos o más elementos problema, es decir, las comparaciones pueden hacerse entre una huella de origen conocido (indubitada) y una de origen desconocido (dubitada) lo que llamaremos “confrontas uno a uno”, o bien una huella dubitada comparada con una base de datos. Cual sea el tipo de comparación que se haga para la identificación el propósito es individualizar, esto es, eliminar todos los elementos similares pertenecientes a un universo, dejando solo una sola fuente de origen posible (Ashbaugh, 1999).

Para establecer la identidad de una persona, los y las dactiloscopistas aplican un método llamado ACE-V (Langenburg, 2009), las siglas son un acrónimo que representa las cuatro etapas del proceso de examen: análisis, comparación, evaluación y verificación, éstas dos últimas proporcionan los estándares mínimos para cumplir con ciertos criterios Daubert, por ejemplo, la revisión por pares y el uso de estándares, respectivamente (Loyzance, 2017). De acuerdo con la Organization of Scientific Area Committees (OSAC) Friction Ridge Subcommittee (FRS), las etapas del método ACE-V pueden definirse de manera general como: a) análisis a la evaluación de la cantidad y calidad de los detalles de las crestas de fricción de una impresión, b) comparación que se refiere a la confronta de impresiones, c) evaluación; que alude al proceso de decisión para emitir una conclusión, y d) verificación que es un examen posterior de las impresiones realizado por otro u otra dactiloscopista (Langenburg, 2009). Cada una de las etapas conlleva una serie de acciones que son claves para realizar un estudio comparativo basado en evidencia, su conocimiento detallado resulta crucial para la correcta aplicación de la metodología ACE-V:

1. *Análisis.*

Corresponde a la primera fase del método ACE-V. Consiste en realizar una evaluación de las características de la huella con la finalidad de conocer cuántos y cuáles de los elementos de estudio (tipos fundamentales y minucias) son visibles en ella, por lo que se realiza un análisis minucioso de las impresiones tomando en cuenta la claridad y nitidez de la imagen, los efectos producidos por la deposición del dedo sobre una superficie como la presión, distorsión y superposición de las crestas, así como la instrumentación y las técnicas empleadas para la toma de muestra (ver Imagen 11). Ésta fase es crítica, porque se determina la idoneidad de la huella a partir de la suficiencia de información, y los criterios de tolerancia de imagen que se establezcan para el resto del estudio. Generalmente, el análisis aumenta su dificultad en proporción a la calidad de la impresión, es decir, entre menor cantidad de detalles presentes en el dactilograma, mayor obstáculo presentará el análisis (Loyzance, 2017, Champod, et. al., 2004, Ashbaugh, 1999 y Moses, 2019).



Imagen 11. Algunos efectos de distorsión en las impresiones producidos por la fricción del dedo en la superficie: a) Empaste b) Poca presión y c) Movimiento.

2. *Comparación.*

Corresponde a la segunda fase del método ACE-V. Consiste en comparar impresiones dactilares de manera objetiva, a partir de comparativas visuales y/o físicas entre elementos dubitados e indubitados; éste proceso debe realizarse de manera secuencial, espacial y configurativa. El propósito de la fase de comparación es

identificar todos los puntos de comparación encontrados en ambas impresiones en ubicaciones y orientaciones similares para determinar si pueden tener su origen en la misma fuente (Champod, et. al., 2004, Ashbaugh, 1999 y Moses, 2019).

Para éstas dos primeras fases es indispensable que se tomen en cuenta los tres niveles de detalle de las huellas dactilares (Ashbaugh, 1999), ya que a partir del análisis observacional se determinará la claridad de la impresión y a qué nivel pueden ser comparadas. El nivel uno de detalle se refiere a la determinación del tipo fundamental; el nivel dos a la identificación de minucias, y al señalamiento de formaciones como cicatrices; y el nivel tres se refiere a las características intrínsecas de las crestas de fricción como el ancho de las mismas y las ubicaciones relativas de los poros (Ashbaugh, 1999 y Moses, 2019).

Cabe precisar que las huellas a comparar no siempre tienen la misma calidad de imagen, por lo que él o la dactiloscopista se encargará de determinar los límites de tolerancia que admitirá en su estudio; hecho que cobra importancia porque en contextos forenses reales, no siempre se cuenta con huellas dubitadas con un alto nivel de detalle, sin embargo, no quiere decir que no pueda realizarse un estudio, ya que se tendrá que analizar hasta que nivel es comparable cada huella. Una vez aclarado lo anterior, continuemos con las últimas fases del método ACE-V.

3. *Evaluación.*

Corresponde a la tercera fase del método ACE-V. A partir de los datos recopilados durante las fases de análisis y comparación, la persona experta concluirá si es probable que las impresiones provengan de un mismo individuo, el resultado puede conducir a una de tres conclusiones: una identificación, exclusión o resultado no concluyente (Moses, 2019). La evaluación puede dividirse en dos tomas de decisiones: la primera aborda la concordancia de las configuraciones de las crestas de fricción y la segunda si hay suficiente unicidad, éstos juicios son catalogados como subjetivos, sin embargo, para reducir ésta variable el o la dactiloscopista debe apegarse en sentido estricto a un ambiente sistemático y estructurado (Moses, 2019 y Ashbaugh, 1999).

4. *Verificación.*

Corresponde a la cuarta y última fase del método ACE-V. La verificación es una forma de revisión completa e independiente del estudio realizado de las huellas, es decir, no se reduce a la comprobación de resultados, su propósito es verificar el proceso de identificación y la objetividad de cada una de las fases del método ACE-V (Ashbaugh, 1999). La verificación puede realizarse de diferentes maneras: la primera consiste en que un(a) segundo(a) dactiloscopista repita el examen de la impresión utilizando el método ACE sin conocer la conclusión del primer análisis y la segunda es que lo realice conociéndola; cualquier verificación que se realice tiene que seguir un proceso ciego, independiente o crítico para minimizar el riesgo de error por sesgo (ENFSI, 2015).

BIOMETRÍA

Generalidades de la biometría

El proceso de identificación humana, desde cualquier área del conocimiento que intervenga, ha ido evolucionando con el avance tecnológico a lo largo del tiempo. La sistematización de los procesos de captura, post-proceso y análisis de características físicas del ser humano, ha permitido el aumento de su confiabilidad al ser presentadas como prueba en un caso legal. Es en este punto, donde la biometría juega un papel importante para el conocimiento de la biología del ser humano, tanto a nivel individual como poblacional (Quinto Sánchez, López-Escobedo y Loyzance, 2017), debido a que se requiere de referencias estadísticas de las características principales de una población para robustecer las premisas de unicidad de los diferentes caracteres biométricos que se estudien, a fin de entender su comportamiento y la interacción de los mismos con el medio que los rodea.

La palabra “biometría” en su etimología está compuesta del prefijo griego «βιο» (bio) que significa vida y del sufijo metría «μετρία» proveniente de la raíz de «μετρον» (metron) que quiere decir medida (Haber, 2004), lo que en su conjunto se traduciría como “medir la vida”. La biometría como ciencia hace alusión a todos aquellos métodos de reconocimiento de personas que basan su estudio en las propiedades medibles de carácter físico, fisiológico, del comportamiento o rasgos de personalidad, que son atribuibles de manera única a un solo individuo (Jain, et. al., 2004 y INTAIPD, 2018).

Como vocablos de uso común en la *Biometría* se encuentran: biométrico, rasgo biométrico, dato biométrico y sistema biométrico. Se conoce como rasgo o caracter biométrico a aquella característica distintiva del ser humano que permite a partir de su evaluación biométrica llegar a una individualización (Jain et. al., 2004; Labati et. al., 2016), dentro de los rasgos biométricos se encuentran características biológicas y del comportamiento, las primeras corresponden a la huella digital, la morfometría de la cara, el iris, la retina, el tamaño y forma de la mano, el oído y el ADN, y las segundas a la firma, la forma de caminar, la voz, el patrón de pulsación en el teclado, entre otras (Labati et. al., 2016 e INTAIPD, 2018), a la información que se extrae de éstos caracteres se le llamará dato biométrico (Jain et. al. 2004).

La palabra biométrico también puede asociarse por sí sola al equipo o sensor de un dispositivo digital que puede capturar y registrar los rasgos biométricos antes mencionados. Por último, al sistema de reconocimiento de patrones que funciona, de manera general, a partir de la adquisición, extracción y comparación de rasgos biométricos basándose en características establecidas en una plantilla o patrón base, se le conoce como sistema biométrico (Saini. y Kapoor, 2016; El-Abed y Charrier; 2012).

Entre los factores que determinan la idoneidad de un carácter biológico o del comportamiento para ser utilizado como dato biométrico en un proceso de identificación (Jain et. al., 2004 y INTAIPD, 2018), se encuentran:

1. Universalidad: Son rasgos con los que cuentan todas las personas.
2. Unicidad: El rasgo es suficientemente diferente entre los individuos que componen la población por lo que no existen dos biométricos con las mismas características.
3. Permanencia: El rasgo biométrico de un individuo debe ser invariante a lo largo del tiempo en cada persona.
4. Medibles de forma cuantitativa.

Estos factores pueden estar presentes, en mayor o menor proporción (ver Imagen 12) en los caracteres elegidos, ésta premisa no implica que su uso se vea desprestigiado, al contrario, conocer los alcances que tiene cada carácter biométrico desencadena resultados reales que contemplen las condiciones naturales del rasgo a evaluar, aunado a que, dentro del contexto forense se recomienda el uso de cuantos caracteres estén disponibles con la finalidad de robustecer el análisis para establecer la identidad.

RASGO BIOMÉTRICO	UNIVERSALIDAD	DIFERENCIA	PERMANENCIA	COLECTIVIDAD	RENDIMIENTO	ACEPTABILIDAD
ADN	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	Bajo
Oreja	Medio	Medio	Alto	Medio	Medio	Alto
Cara	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Alto
Termograma facial	Alto	Alto	Bajo	Alto	Medio	Alto
Dermatoglifo	Medio	Alto	Alto	Medio	Alto	Medio
Andar	Medio	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alto
Geometría de mano	Medio	Medio	Medio	Alto	Medio	Medio
Venas de mano	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio
Iris	Alto	Alto	Alto	Medio	Alto	Bajo
Patrón de teclado	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	Medio
Olor	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Medio
Impresión de palma	Medio	Alto	Alto	Medio	Alto	Medio
Retina	Alto	Alto	Medio	Bajo	Alto	Bajo
Firma	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alto
Voz	Medio	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	Alto

Imagen 12. Rasgos biométricos y la evaluación sobre una escala ordinal entre alto, medio y bajo de los requerimientos para ser utilizado como dato biométrico. Tabla obtenida de Quinto Sánchez, López-Escobedo y Loyzance (2017).

Los sistemas de reconocimiento biométrico pueden atribuir la individualidad de una persona a partir de dos vertientes: la verificación o la identificación. En la verificación, se compara la identidad conocida de un individuo con un banco de datos biométricos adquiridos previamente. En cambio, en la identificación, se compara el carácter biométrico individual de origen desconocido de la persona que se desee identificar con una base de datos, a fin de que el sistema, en términos de probabilidad, arroje una serie de candidatos de los que se deberá discriminar con posterioridad (Labati et. al., 2016; Quinto Sánchez, López-Escobedo y Loyzance, 2017; Jain et. al., 2004 y INTAIPD, 2018).

La necesidad de establecer una identidad segura y confiable ha impulsado la adopción de tecnologías biométricas en una amplia gama de aplicaciones, entre ellas destacan: la identificación de presuntos responsables de hechos delictivos, verificación de antecedentes penales, vigilancia (a través de cámaras), control de fronteras, reducción de fraude, control de acceso físico y virtual (Tistarelli y Champod, 2017, y Vatsa, et. al. 2018), identificación de personas en desastres masivos, y actualmente, se han adoptado medidas para la identificación de personas desaparecidas (García, 2020).

Los datos que se extraen de los caracteres biológicos son únicos en cada individuo, por lo que son ingresados a un sistema biométrico cuya precisión se mide en términos de tasas de error, es decir, falsos positivos (identidad arrojada como positiva siendo negativa) y falsos

negativos (identidad arrojada negativa siendo positiva) (Jain, 2008 e INTAIPD, 2018). Pero, ¿cómo funciona un sistema biométrico? Para contestar a ésta pregunta es importante aclarar que el diseño particular de cada uno está en función del carácter biométrico que se evaluará, sin embargo, todo sistema tiene pasos críticos o fases (INTAIPD, 2018) que constituyen un funcionamiento homologado, mismas que se describen a continuación:

- a. Registro: se realiza a través de sensores o aparatos que guardan muestras biométricas, abarca tanto la recolección de la muestra como su ingreso al sistema.
- b. Conversión: es el proceso por el cual se convierte la muestra recopilada en un archivo compatible con el sistema biométrico utilizado.
- c. Almacenamiento: proceso por el que se guardan las plantillas generadas durante la fase de recolección.
- d. Comparación: un archivo nuevo es confrontado con los archivos previamente guardados en la base de datos respectiva, a partir de cálculos algorítmicos y de puntos de coincidencia que se evalúan con base en umbrales de coincidencia previamente establecidos.
- e. Decisión: consiste en el proceso a través del cual se determina de forma automática o semiautomática (con asistencia humana) la identificación o verificación de la muestra biométrica (p. 14).

Biometría dactilar y la ciencia forense

Como se aborda en el apartado anterior, la biometría está cada vez más presente en nuestra cotidianidad, a pesar de existir una variedad de caracteres biométricos de uso común, las huellas digitales son empleadas con mayor frecuencia. La relevancia de la biometría dactilar en la sociedad moderna se ha visto impulsada por el avance tecnológico y la necesidad de sistemas de gestión de identidad (Jain et. al., 2008), existiendo una aplicación directa en temas de seguridad nacional, seguridad privada, comercio electrónico, acceso a dispositivos digitales y documentos de identificación oficial (INTAIPD, 2018).

Tal como se mencionó, una de las aplicaciones directas de la biometría dactilar en el ámbito de la ciencia forense es para la identificación de personas, tiene que quedar claro que ésta

necesidad puede abordarse desde dos fines diferentes, el primero es para la identificación de personas que estén atravesando por un proceso legal como presuntos responsables de un hecho delictivo y el segundo es para la identificación de personas dadas como desaparecidas dentro del contexto de la crisis forense de nuestro país. Es entonces cuando surge el cuestionamiento ¿Qué herramientas se ocupan para éstas aplicaciones?

En 1963, la División de Identificación del FBI se dio cuenta que la búsqueda manual en el archivo criminal no seguiría siendo viable durante mucho más tiempo, dado el volumen de fichas dactiloscópicas, registradas y almacenadas, por lo que, en un intento de resolver este problema, buscó la ayuda de los ingenieros del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) para desarrollar un programa automatizado para el proceso de identificación de huellas dactilares. Simultáneamente otros países como China, Francia, Reino Unido y Japón también desarrollaron propuestas al respecto. Fue así que, aproximadamente 20 años después, surgió el Sistema Automatizado de Identificación de Huellas Dactilares - AFIS por sus siglas en inglés- (Moses, 2017).

La mayoría de los sistemas automáticos de identificación de huellas dactilares (AFIS) se basan en las minucias de una huella digital, reconociéndolas como características principales para la comparación. El propósito central del sistema radica en acelerar el proceso de búsqueda a fin de proporcionar una lista de candidatos que él o la dactiloscopista deberá evaluar mediante confrontas uno a uno (Tistarelli y Champod, 2017). En relación a la interoperabilidad de los sistemas AFIS, estos pueden estar vinculados a otras bases de datos, incluso a otros sistemas AFIS que analógicamente mantienen una compatibilidad entre sus archivos, sin embargo, existen bases de datos que no cumplen con requisitos mínimos de lenguaje -esto no debe verse como algo negativo ya que depende de los fines específicos de la base y la naturaleza de la muestra- y en consecuencia, no pueden o se complica el ingreso de datos al sistema, ésta problemática dificulta la compartición de datos entre instituciones al momento de solicitar alguna búsqueda automatizada, hecho que afecta directamente el proceso de identificación (Komarinski, 2005).

Sobre el tipo de muestra, las impresiones que se ingresan al sistema AFIS son de naturaleza latente, es decir, por lo general sólo se constituyen de un fragmento de la huella, así mismo, también son ingresados dactilogramas correspondientes a los diez dedos de la mano, que comúnmente, tienen una mejor calidad y cantidad de información respecto a las huellas latentes. Es importante puntualizar que el hecho de que se tenga una huella que represente solo una porción de la totalidad de la misma (cómo son también los biométricos de apoyo) no imposibilita la realización de un estudio, ya que, aún en sistemas automatizados, el o la dactiloscopista evalúa a partir de los niveles de detalle 1, 2 y 3 la calidad de la huella.

Cómo se mencionó en el párrafo anterior, para que el AFIS cumpla con sus funciones, la muestra debe estar codificada bajo un lenguaje informático compatible entre sí. Las huellas deben ser capturadas a través de un escáner que genere una réplica digitalizada de alta resolución donde se aprecien a detalle las crestas de fricción, la impresión resultante aparecerá en una pantalla para su visualización, misma que será compartida con bases de datos AFIS después de un proceso de control de calidad o mejoramiento de imagen, en el cual, si la huella o huellas son aptas, pasarán a un codificador, cuyo trabajo es extraer, a partir del algoritmo establecido por el proveedor AFIS, las características de las imágenes como lo son las particularidades de las minucias y el tipo fundamental, una vez obtenida su codificación se hará una comparación con la base de datos pertinente y arrojará, si así se encuentran, una lista de posibles candidatos (Komarinski, 2005, y Tistarelli y Champod, 2017) como se muestra en la Imagen 13. Como dato adicional, actualmente en México se cuenta con la Red Nacional AFIS-FGR, la cual está instalada en las delegaciones estatales y se encuentra con una Estación Central en la Agencia de Investigación Criminal en la Ciudad de México, lo que permite registrar, almacenar y comparar en pocos minutos las huellas dactilares de personas (Aguilar-Ruiz, 2007).



Imagen 13. Diagrama general de un sistema de reconocimiento basado en huellas dactilares.

Continuando con el contexto mexicano, y abordando brevemente la aplicación de la biometría dactilar en la identificación de personas desaparecidas, se tiene conocimiento de convenios institucionales que permiten el intercambio de información biométrica, específicamente, de huellas digitales, en atención a la crisis forense del país. Dentro de esta comunicación, la Fiscalía General del Estado de Tamaulipas ha realizado el cotejo de huellas dactilares con el Instituto Nacional Electoral para fines de identificación, arrojando cerca de un 30% de las huellas consultadas con resultados positivos; esto deja claro que, las huellas digitales permiten la correspondencia de miles de identificaciones en México (García, 2020).

Bases de datos biométricas dactilares: un contexto internacional y mexicano

Dentro del contexto internacional, la creación de datos biométricos dactilares no se ha realizado de manera solitaria, es decir, cada país tiene información de su población a partir de la conjunción de bases de datos que integran varios rasgos biométricos, por ejemplo, la Interpol, desarrolló una plataforma electrónica denominada |24/7 Sistema Mundial de Comunicación Policial. Este sistema interconecta todas las Oficinas Centrales Nacionales con el Cuartel General de la Interpol; permite el intercambio de información tanto policial como de investigación criminal a nivel mundial (INTERPOL, 2007; Díaz-Rodríguez, 2013) y a su vez, cuenta con la base de datos Identificación de Víctimas por Desastres (FastID) (Díaz-Rodríguez, 2013). En este mismo sentido, la Interpol ha desarrollado normatividad interna para el acceso directo, descarga, interconexión y el registro directo de información en una base de datos autónoma por parte de una entidad autorizada, por solicitudes de información o en situaciones de urgencia. También, cuenta con disposiciones relativas al seguimiento del tratamiento de la información en los archivos y su acceso (INTERPOL, 2012).

En Australia en cooperación con los gobiernos estatales y territoriales, se ha establecido un sistema de ADN y de huellas dactilares de investigación criminal. Estas bases de datos criminales son creadas y administradas por la Comisión Australiana de Inteligencia Criminal (conformada la Comisión Australiana del Crimen y *CrimTrac*), que a su vez han sido implementadas con el objetivo de ayudar a la policía, agencias de seguridad y entidades de aplicación de la ley con el fin de facilitar los servicios de intercambio de información (ACIC, 2016). Otros países como Nueva Zelanda y España han conformado bases de datos únicamente de DNA (Ácido Desoxirribonucleico por sus siglas en inglés) (Díaz-Rodríguez, 2013).

Un aspecto importante a considerar, es que, a pesar de existir una variedad internacional de bases de datos de corte forense, cada país es el encargado de establecer las medidas de registro, intercambio y protección de sus bases de datos biométricas, así también de establecer el marco normativo en el que se fundamenta su uso, por lo que puede o no haber

una logística óptima en el intercambio de información, impactando así los procesos de identificación.

Dentro del contexto nacional, son escasas las bases de datos de uso forense en comparación con el contexto internacional. En el sexenio del ex Presidente Enrique Peña Nieto se creó la Plataforma México, misma que se pensó como una herramienta fundamental para el intercambio de información delictiva al integrar todas las bases de datos biométricas relativas a seguridad pública en el país entre las que se consideraron, el Registro de Licencias de Conducir, Registro Nacional de Armamento y Equipo, AFIS, Informe Policial Homologado, Registro Nacional de Información Penitenciaria, Sistema Automatizado de Identificación por Voz, entre otros (Cáceres, 2017); actualmente éste proyecto se encuentra, cómo lo han descrito algunos periodistas, “a un paso de colapsar” derivado de la falta de mantenimiento a servidores, licencias desactualizadas, softwares disfuncionales o inconclusos, entre otras causas (Tovar, 2021).

Países como Francia, Australia, Nueva Zelanda y España son un ejemplo del contexto que se tiene en relación a bases de datos biométricas de uso forense, sin embargo, como se mencionó en la introducción, en México hay otro conjunto de bases cuyo uso radica en ámbitos electorales, económicos, de salubridad, educativos y financieros, entre las que se encuentran, el INE, SAT, IMSS e ISSSTE, Universidades y Bancos, respectivamente (Campos, 2020); cada una de éstas bases ha sido creada para fines propios y específicos de cada institución por lo que, los lineamientos de recopilación, sistematización, almacenamiento, intercambio y resguardo de información dependen de cada una (García, 2020).

En este punto resulta pertinente remitirnos al trabajo del Dr. Diego García Ricci en su escrito “Privacidad e Identificación Forense de Personas Desaparecidas: Análisis Jurídico sobre el Intercambio de Datos Personas con fines de Identificación Humana”, en el que expone puntos cruciales referentes al intercambio de información institucional en el contexto actual del país, entre los que destacan (García, 2020):

- a. México cuenta con una legislación que dota de amplias facultades a las comisiones de búsqueda y a las fiscalías especializadas tanto para acceder a información como

para llevar a cabo cruzamiento de datos con el fin de buscar e identificar a una persona reportada como desaparecida, así como investigar los delitos correspondientes.

- b. El intercambio de información muchas veces no se verifica porque las bases de datos no son interoperables entre sí. La información existe, pero se encuentra fragmentada.
- c. Se necesitan emitir diversas normativas secundarias (lineamientos) para homologar los procesos con los que actualmente se intercambia información entre diversas instituciones, éstos lineamientos deberán explicar la forma como debería llevarse a cabo la recopilación, sistematización, almacenamiento, cruzamiento y resguardo de información.

De los puntos anteriores se puede establecer una problemática clara, -misma que se contempló como parte del planteamiento del problema en el presente trabajo- existen registros independientes de diferentes instituciones sin un requisito de compatibilidad con respecto a la estandarización técnica del registro de huellas digitales y a la instrumentación utilizada para ello, lo que en definitiva ha impactado desfavorablemente el contexto de la crisis en materia de identificación de personas. Referente a la legislación aplicable al contexto mexicano, si bien se tienen contempladas las facultades para acceder a las bases de datos, sigue ignorándose la necesidad de analizar el material que las integran, minimizando el potencial que tiene la información poblacional para robustecer los resultados y metodologías empleadas en los procesos de identificación forense, específicamente dentro del área de la biometría dactilar.

De forma paralela a las acciones de recopilación, sistematización y con la propuesta de análisis de biométricos dactilares se deben prever ante todo medidas para la protección de los mismos. La utilización amplia de la biometría implica riesgos inminentes, por ejemplo, en el caso específico de los biométricos dactilares una vez identificada la posición, orientación y cantidad específica de minucias en la huella se obtienen “plantillas”, es así como se está ante datos sensibles que permite establecer la identidad directa de una persona en específico, si las bases de datos son vulneradas se expone dicha información a riesgos como la replicación de la huella con fines ilícitos tales como falsificaciones para acceder a lugares restringidos, suplantación de identidad con objeto de criminalizar al individuo, acciones discriminatorias, entre otras (Rojas y Sánchez, 2012), es por ello que se deben

priorizar y seguir disposiciones en materia de protección de datos personales, señalando con claridad las finalidades de su empleo, las reglas y la garantía del consentimiento informado para el uso de datos personales sensibles como los biométricos dactilares (García, 2020).

A partir de las ideas desarrolladas en éste apartado, resulta pertinente tomar en consideración el cuestionamiento social, científico y jurídico referente al debate humanitario de la atención a la crisis forense y la ponderación de derechos humanos fundamentales en el contexto actual de nuestro país, es decir, el análisis de bases biométricas dactilares implica, entre otras cosas, la obtención y el manejo de información individual y poblacional sensible que permite conocer los patrones de comportamiento fenotípico como son las huellas dactilares específicamente en nuestro país, tema que se abordará con mayor profundidad en el siguiente apartado, en éste punto se requiere entender el análisis como una forma de desarrollo científico y como un medio para prever la procuración y resguardo del derecho de las víctimas de desaparición a ser identificadas, para ello, es necesario abrir la puerta a nuevas perspectivas que impliquen el análisis de bases de datos biométricos dactilares bajo la seguridad de que se está protegiendo tanto el material analizado como la información obtenida de ello.

La implementación de la biometría dactilar en materia de búsqueda e identificación de personas es, sin duda, "una luz en el camino" para atender la crisis forense presente en nuestro país, siendo así que en México, el vínculo para el intercambio de información biométrica se ha visto fortalecido con instituciones como el INE, sin embargo, hay que tener presente que la información que se comparte son datos sensibles personales (INTAIPD, 2018) y que las bases de datos (específicamente del padrón electoral) han sido creadas para fines propios de la institución, situación que refleja la obligación que tiene cada una respecto a la protección de los datos personales que resguardan (García, 2020).

El análisis de bases de datos biométricas dactilares y en general cualquiera que implique fines forenses, no debe verse como una violación de derechos humanos, al contrario, debe abordarse como una procuración de los mismos, a partir del establecimiento de condiciones que aseguren ante todo la protección de datos personales de la población y al mismo tiempo

tomen en cuenta las necesidades científicas de las diferentes áreas forenses, sin pasar por alto que el uso deliberado de muestras biológicas - como lo son las huellas dactilares-, implica riesgos que pueden desencadenar en una criminalización de algunos sectores de la población (García, 2020).

CARACTERIZACIÓN POBLACIONAL A PARTIR DE HUELLAS DACTILARES

Perspectiva antropológica

La palabra “antropología” deriva del griego *anthropos* que significa “humano” y *logia* que refiere el “estudio” de un fenómeno, en conjunto, puede entenderse como el “estudio del ser humano”. La antropología como ciencia busca definir e interpretar aspectos relacionados al ser humano, desde los ámbitos del comportamiento, la biología, el lenguaje y la cultura en tiempos pasados y presentes, en consecuencia, se han creado ramas que se encargan del estudio específico de cada uno de estos ámbitos, las más comunes son la arqueología, la antropología sociocultural, la antropología lingüística y la antropología física/biológica (Langley, 2018; Langley y Tersigni-Tarrant, 2017), para fines de la presente tesis sólo se abordará brevemente ésta última.

La antropología biológica se caracteriza porque su objeto de estudio es la variabilidad y evolución humana, tanto en poblaciones antiguas, como contemporáneas, desde diferentes posturas y teorías a lo largo del tiempo, contemplando entre otras cosas, los orígenes biológicos y su interacción, adaptación y variación con el medio dentro de un contexto evolutivo (Langley y Tersigni-Tarrant, 2017), entre los fenotipos -conjunto de caracteres visibles que un individuo presenta como resultado de la interacción entre su genética y el medio- estudiados están las características faciales, óseas y dermatoglíficas del cuerpo humano. Dentro de ésta rama se encuentra la antropología forense, que no es más que la aplicación del conocimiento de la antropología física/biológica a contextos de identificación de individuos en vida o muerte, habiendo en ésta última la posibilidad de proporcionar información sobre las circunstancias que la rodearon (Langley y Tersigni-Tarrant, 2017).

Resulta entonces pertinente, centrar nuestra atención al área de la antropología física/biológica que se encarga del estudio de las configuraciones de las crestas de fricción que están presentes en las regiones digital, palmar y plantar de manos y pies respectivamente, la dermatoglifia (García-Cuevas, 2018; Oktem, 2015). Con la finalidad de evitar confusión, recordemos la terminología mencionada en el apartado de “Dactiloscopía”, de manera que se entienda a la huella natural como sinónimo de dermatoglifo digital.

Los dermatoglifos pueden ofrecer perspectivas importantes en la visualización, la naturaleza y el significado de la variación humana (Meier, 1980), las características de las crestas de fricción debido a su gran variedad de formas de expresión y por su propiedad de ser caracteres no adaptativos y no modificables por el medio ambiente, son una valiosa herramienta para ampliar el conocimiento de la diversificación del poblamiento humano (García-Cuevas, 2018).

Se han desarrollado diversas líneas de investigación en función de diferentes perspectivas, entre ellas se encuentra la heredabilidad a nivel familiar y poblacional, la manifestación con diversos síndromes y patologías, el dimorfismo sexual y la descripción de ancestría, por mencionar algunas.

Respecto a la heredabilidad, se conocen aspectos de herencia genética como la relación entre el tipo fundamental y el número de crestas de fricción (Fournier, 2015; Berner, 1982; Holt, 1968), la correlación entre contribuciones maternas y paternas (Berner, 1982) y afinidad entre gemelos monocigotos (Allen, 1968); sin embargo, es necesario explorar la especificidad de los genes y las interacciones genéticas durante el desarrollo embrionario (Meier, 1980). Concerniente al estudio clínico de los dermatoglifos, existe una amplia variedad de patologías con las que se ha buscado una relación, por ejemplo: la presencia de caries y maloclusión dental (Belludi et al., 2021; Singh et al., 2020) el diagnóstico de diabetes mellitus (Padmini, 2011), esquizofrenia (Norovsambuu, 2021), epilepsia (Grinenko, 2018), síndrome de Down (Rajangam, 1995) y síndrome de Turner (Reed, 1977), entre otras. En relación a los estudios poblacionales las primeras comparaciones antropológicas empleando datos dermatoglíficos de diferentes poblaciones se remontan a Galton y a Harris Wilder, quienes propusieron que los patrones de las crestas de fricción estaban asociados con el desarrollo de la almohadilla volar y, sin duda, sentaron las bases para futuras investigaciones sobre la evolución del desarrollo de las crestas de fricción (Barnes, 2011). Recientemente, se han desarrollado numerosos estudios al respecto en diferentes regiones del mundo (Gutiérrez et al., 2008, 2011, 2012, 2013, 2014; Stoney, 2001; Rivaldería, 2017; Taduran et al., 2016; Oktem, 2015; Karmakar, 2006; Kapoor y Badiye, 2014, 2015, 2020; Kaur y Garg, 2011; Hussein y Abdullah, 2006), mientras que a nivel nacional se tienen antecedentes contemporáneos como los de Muñoz (2018), García-Cuevas (2018) y Serrano (1969, 1982).

Éstas investigaciones tienen como objetivo conocer las principales características dermatoglíficas de su población en función de la frecuencia de aparición de los tipos fundamentales y en algunos casos de las minucias.

Perspectiva dactiloscópica y dactiloscopológica

Cómo se ha abordado, dentro del campo de la biología humana, los estudios dermatoglíficos se han utilizado tradicionalmente para caracterizar poblaciones humanas, en el ámbito de la ciencia forense, las huellas dactilares se han empleado con fines de identificación personal, siendo el sexo, la tipología de deltas, la homología, la razón de verosimilitud (LR) y la rareza de tipo fundamental algunas de las perspectivas más estudiadas, mismas que se abordarán a continuación.

Es importante mencionar que, aunque existe una prevalencia actual en la caracterización poblacional alrededor del mundo (perspectiva antropológica), estudios como el de Gutiérrez-Redomero (2014) han expuesto problemáticas al contrastar una gran cantidad de datos dermatoglíficos entre países, una de las más importantes es la cantidad y calidad de información que proporciona la muestra, es decir, deben cuidarse aspectos como la dirección en qué se gira el dedo, la técnica de captura, el tipo de impresión (rodada o plana) y la estandarización del área de análisis de la huella (nuclear y periférica), con la finalidad de favorecer el proceso de comparación poblacional y con ello mejorar los protocolos de identificación. Los aspectos anteriores cobran interés en el presente trabajo debido a que la muestra biométrica analizada es de tipo plana o "de apoyo", en donde el sistema nuclear de la impresión dermatoglífica predomina, en consecuencia sería incorrecto comparar la información obtenida deliberadamente, ya que el desarrollo metodológico de la recolección y análisis de la muestra de diversas investigaciones consultadas no siempre están estandarizadas, sin embargo, un común denominador es el uso de muestras de tipo rodado (Gutiérrez et al., 2008, 2011, 2012, 2013, 2014; Stoney, 2001; Rivaldería, 2017; Taduran et al., 2016; Oktem, 2015; Karmakar, 2006; Kapoor y Badiye, 2014, 2015, 2020; Kaur y Garg, 2011; Hussein y Abdullah, 2006), lo anterior debe de verse como una oportunidad de brindar una aportación que proporcione un proceso metodológico factible para los registros

biométricos mencionados, ya que al ser muestras obtenidas en diferentes contextos y con distintos fines, pueden ser de utilidad para caracterizar a la población.

La determinación del sexo es uno de los aspectos significativos dentro de la identificación humana, especialmente para la antropología, odontología y dactiloscopia; la premisa estudiada para estas áreas es que las mujeres tienen morfológicamente estructuras más finas que los hombres (Thakar, 2018 y Cummins y Midlo, 1961), específicamente en el caso de las huellas dactilares, las crestas tienden a ser más angostas en las mujeres aún cuando se tiene el mismo tamaño de la mano que los hombres (Champod et al. 2004; Lee y Gaensslen 2014; Nayak y Rastogi 2010; Galton 1892; Kaur y Garg 2011). La evaluación de diferencias sexuales en las huellas dactilares ha sido previamente centrada en la variación de rasgos cualitativos y cuantitativos en diferentes poblaciones, entre las que se encuentra población rusa, turca, sudanesa, china, española, argentina, india, entre otras (Ahmed, 2016; Ali y Ahmed, 2020; Karmakar, 2008, Nayak y Rastogi, 2010; Oktem, 2015). La manera más común de análisis es mediante la densidad de crestas, que implica contar el número de crestas en un área específica, los hallazgos presentados indican la existencia de diferencias étnicas y sexuales que se han atribuido a dos determinantes: el ancho de la cresta y la distancia entre ellas (Rivaldería, 2016; Ahmed, 2016). Los resultados de las investigaciones han demostrado que la densidad de la cresta sí presenta dimorfismo sexual inter e intra poblacional.

En relación a la variabilidad de los deltas de las huellas dactilares, son incipientes los trabajos realizados para conocer su variación poblacional, siendo el trabajo publicado por Rivaldería y Gutiérrez Redomero (2021) "*Interpopulational differences in the frequency and distribution of delta types*" -como ellas mismas lo señalan- el primero en analizar la frecuencia y distribución de los diferentes tipos de deltas, los datos obtenidos de diferentes poblaciones podrían ser de interés en la evaluación estadística de la evidencia en la comparación de huellas dactilares, debido a que, en el trabajo exploratorio citado en este párrafo se encontró variabilidad entre poblaciones respecto a los distintos tipos de deltas (Rivaldería y Gutiérrez-Redomero, 2021).

Cómo ya se ha mencionado en apartados anteriores, existen diferentes clasificaciones para los tipos fundamentales, los más comunes basan su desarrollo en verticilos, presillas y arcos. Recordemos que una de las funciones del tipo fundamental es servir como una categoría de

clase, es decir, acelera la búsqueda de una fuente de origen de la huella, de tal manera que si se encuentra un patrón poco frecuente, se podrá realizar una exclusión de aquellas huellas que no correspondan al tipo fundamental de la huella dubitada, alternativamente, si el patrón poco común de la huella dactilar corresponde con el patrón de un dedo, el valor de la identificación podrá verse potenciado debido a la rareza poblacional del mismo (Johns, 2019); sin embargo, para poder elevar el potencial de las premisas mencionadas resulta indispensable conocer la frecuencia de prevalencia del tipo fundamental observado en la población específica de la que sea originaria la huella dubitada, y aún más puntual, conocer si la frecuencia de los patrones son indicativos de un dedo en específico (Galton, 1982).

Ahora bien, una vez explicado a qué se refiere cada una de las perspectivas antes mencionadas para el establecimiento de la identidad con impresiones dactilares, existe una forma de evaluar el peso de la evidencia cuando éstas se incluyen en el producto de un análisis dentro del ámbito forense.

El uso de la "razón de verosimilitud (LR)" se centra en la expresión de la subjetividad e incertidumbre asociada a la evidencia científica forense, e idealmente debe aplicarse a cualquier resultado de dictámenes sin distinción del área en la que se realice. Es una afirmación que transmite la probabilidad de las observaciones dado cada una de las proposiciones o hipótesis establecidas (H). Por ejemplo, la operación comunica la probabilidad de obtener el observado de similitudes entre una huella dactilar de origen conocido y la huella dactilar de origen cuestionado, bajo la hipótesis nula de que las dos muestras tienen el mismo origen (H1) *versus* bajo la hipótesis alternativa que tienen diferentes orígenes (H2) (Morrison, 2011; Neumann et. al, 2007, 2015 y Martire, 2014).

Para el cálculo del LR debe tenerse en cuenta que la evaluación del peso de la evidencia, ya sea hecha mediante la estadística frecuentista (método holístico en función de la frecuencia del rasgo) o Bayesiana (LR), necesita para su cálculo y aplicación, los datos proporcionados por el estudio de variabilidad de características dermatoglíficas en poblaciones humanas, ya que requiere necesariamente de valores de referencia que expliquen el fenómeno de una población desde sus contextos evolutivos específicos (Rivaldería y Gutiérrez-Redomero, 2021).

Como puede vislumbrarse, el conocer las características dermatoglíficas de las huellas dactilares es relevante en contextos forenses, desde la inferencia de sexo, hasta la rareza de tipo fundamental, ya que permiten llegar a la exclusión o identificación de un individuo; de igual manera también es sabido que dichas características presentan diferencias interpopulacionales que deben ser contempladas por la dactiloscopia con el objetivo de evaluar en términos de probabilidad los resultados de los procesos de identificación, es decir, no sólo observar las similitudes y diferencias en dos impresiones a fin de determinar si provienen de la misma fuente, sino también incorporar la probabilidad de observar las similitudes y diferencias de si las dos impresiones provienen de diferentes fuentes (NIST, 2012), lo que correspondería al uso de bases de datos poblacionales de referencia.

De igual manera, deben comenzar a generarse metodologías de análisis de huellas dactilares que contemplen el factor del error humano conjuntamente con el uso de herramientas estadísticas que ayuden a medirlo, puntualizando que la incidencia de errores no debe considerarse un aspecto negativo del proceso de identificación toda vez que son parte integral de toda medición que constituye un análisis, razón por la cual deben estudiarse a partir de técnicas experimentales que repitan las observaciones del fenómeno, con el objetivo de detectar, analizar, cuantificar y reducir el error, para así poder establecer objetivamente la validez de los resultados del análisis (PCAST, 2016, NIST, 2012 y Kadafar, 2019).

Sinergia de la perspectiva antropológica y dactiloscópica: su impacto en la identificación humana

Para éste punto podría generarse alguna confusión entre las terminologías empleadas dentro del estudio de las crestas de fricción, hasta ahora, se ha llegado al uso de los términos como dermatoglifia, dactiloscopia, dactiloscopología y lofoscopia; a pesar de tener en común el fenotipo de estudio (crestas papilares o pliegues de flexión), el objetivo de cada una es lo que determina las principales diferencias. La dermatoglifia es empleada con frecuencia dentro del contexto de estudios de antropología o biología humana y ciencias médicas (García-Cuevas, 2018), la lofoscopia y dactiloscopia tienen fines forenses, sin embargo la primera abarca el estudio de las zonas de piel de fricción como dedos, palmas y plantas de los pies, mientras que la segunda centra su estudio en las falanges distales de los dedos de la mano (FGR, 2021 y Pérez, 2020), y finalmente la dactiloscopología profundiza en el estudio

de la dactiloscopia con fines científicos o prácticos (de Antón y Barberá, 2017), a pesar de que los fines propios de cada área son diferentes, deben dejar de ser excluyentes entre sí, es decir, cada una aporta al área de la identificación aspectos que robustecen el análisis de las impresiones dactilares.

Tal como se ha desarrollado en el presente apartado, la perspectiva antropológica, específicamente desde la dermatoglifia contempla aquellas características evolutivas de las huellas dactilares, se refiere a la caracterización poblacional como un área que ha sido abordada por varios y varias investigadoras a lo largo del mundo, sin embargo, resulta natural que sus trabajos no tengan por objetivo abarcar las diferentes necesidades del ámbito forense; por su parte, a la Dactiloscopia se le ha impulsado para robustecer con estadística o parámetros poblacionales los resultados de sus análisis.

Haciendo referencia a lo descrito en el apartado de "Metodología ACE-V" resulta oportuno recordar que la conclusión de un dictamen en Dactiloscopia se encuentra a cargo del o la dactiloscopista correspondiente, basando en su experiencia la identificación o la exclusión del listado de huellas arrojado por el AFIS en confronta con la huella dubitada, aunque en la etapa de verificación se pretende reducir el factor del error humano en la totalidad de la metodología, lo cierto es que sigue existiendo la necesidad y la invitación por organismos internacionales de contemplar referencias poblacionales que robustezcan la premisa de unicidad de la huella dactilar. Derivado de lo anterior, debe de existir una sinergia entre ambas perspectivas, a fin de que se complementen entre sí.

Conjuntando el contexto de la biometría dactilar del país, la importancia del análisis de bases de datos de impresiones dactilares y la relevancia de conocer la variabilidad dermatoglífica de la población, a manera de prospectiva y retomando el trabajo del Dr. García Ricci respecto a la legislación con la que cuenta México para la recopilación, sistematización, almacenamiento, cruzamiento y resguardo de datos biométricos con el fin de identificar a una persona reportada como desaparecida (García, 2020), aún no se considera formalmente el análisis de bases biométricas, sin embargo, el constante uso de biométricos dactilares de apoyo amerita comenzar a trabajar en el establecimiento de lineamientos que regulen interna y externamente la protección de datos y el alcance de la información derivada de ellos, dicha situación implica a su vez, tomar en cuenta aquellos ámbitos que se ven implicados en éste

desarrollo, como el jurídico, al representar la fuente legal respecto a la protección de datos personales en las leyes correspondientes como la Ley General en Materia de Desaparición Forzada de Personas, Desaparición Cometida por Particulares y del Sistema Nacional de Búsqueda de Personas (Ley General) y la Ley Federal de Datos Personales, entre otras (García, 2020).

En este sentido, generar investigaciones y aplicaciones de la ciencia forense basada en evidencia requiere la visibilización y el reconocimiento de sus necesidades para el fortalecimiento de sus metodologías, ya que no se puede ni debe de ignorarse el escrutinio científico que requieren los procesos de identificación, por ende, debe de dotarse a las ciencias y disciplinas forenses de herramientas legislativas que amparen e impulsen su impacto en la identificación humana.

PRUEBAS ESTADÍSTICAS EN EL ANÁLISIS DE HUELLAS DACTILARES

La ciencia forense tiene un impacto directo en el mundo real, tanto en la identificación de personas desaparecidas como en los procesos penales, donde la vida de las personas o su libertad a menudo dependen del análisis forense que realiza el o la experta en la ciencia o disciplina correspondiente; desafortunadamente, se ha adoptado la idea de que la prueba científica es infalible atribuyendo a sus resultados el estigma de certeza y confiabilidad absoluta.

Ésta situación ha traído consecuencias perjudiciales en la vida de personas que han sido inculpadas de delitos, tal es el caso de Brandon Mayfield quien fue arrestado por el FBI en 2004 tras considerarlo como sospechoso de haber perpetrado los atentados del 11 de marzo (11-M) en Madrid, dicha detención fue motivada por una presunta coincidencia entre las huellas dactilares encontradas en una mochila con explosivos utilizada en la comisión del delito y las huellas de Mayfield registradas en la base del FBI, tras prestar servicio en el ejército (ver Imagen 14). Es necesario acotar que las huellas estaban incompletas, y que el FBI alegó haber hecho una proyección informática que permitía revelar y completar la totalidad de la huella y aún más importante, que Mayfield no se encontraba en España durante los hechos. Tras una revisión, la Policía Española anunció que la identificación era errónea toda vez que las huellas le pertenecían a Daoud Ouhnane, un residente de Argelia (Rodríguez y Townsend, 2004).

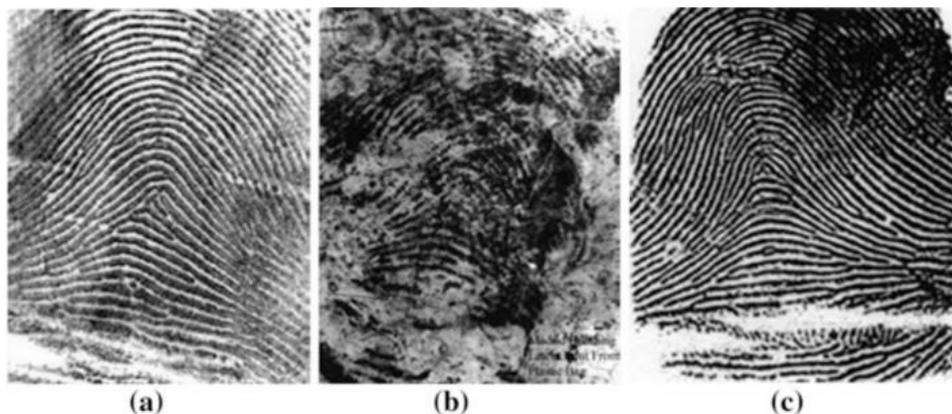


Imagen 14. Huellas relacionadas con el caso Mayfield donde a) huella de referencia de Brandon Mayfield, b) huella recolectada del lugar de intervención y c) huella de referencia de Daoud Ouhnane (Tistarelli y Champod, 2017).

Éste caso es un claro ejemplo de que la ciencia forense no es infalible, así como existe incidencia de errores en la identificación de individuos con huellas dactilares, también han existido con perfiles genéticos, muestras odontológicas, lingüísticas y de reconocimiento facial, lo que demuestra una necesidad estricta por revisar, corregir o mejorar los métodos actuales que se utilizan para identificación.

Ante ésta realidad, diferentes instituciones y organizaciones han establecido recomendaciones y/o lineamientos mínimos que deben cumplir aquellas áreas del conocimiento forense para poder validar científicamente los métodos que emplean, evaluar los resultados producidos de ellos y valorar la admisibilidad de la prueba científica como evidencia, ejemplos de éstos lineamientos son el *Reporte “Forensic Science in Criminal Courts: Ensuring Scientific Validity of Feature-Comparison Methods”* del PCAST (PCAST, 2016), el *Estándar o criterios de Daubert* establecidos en la Ley Federal de los Estados Unidos (Alcoceba, 2018, García, 2016) y el *Report Latent Fingerprint Examination del Forensic Science Assessments: A Quality and Gap Analysis* (AAAS, 2017).

En relación al PCAST, como se mencionó en la introducción, establece que para que un método de comparación de características MCC sea científicamente válido, se deben mostrar los procedimientos que lo componen, haciendo énfasis que para lograrse deben estar basados en estudios empíricos que sustenten su repetibilidad, reproducibilidad, confiabilidad y precisión (PCAST, 2016), por su parte, el *Estándar Daubert* hace énfasis en los criterios de carácter valorativo que deben cumplir las metodologías con las que la evidencia es analizada, dando como resultado cinco criterios: a) La corroboración empírica y falsabilidad de la teoría científica en que se sustenta su producción, es decir, si se ha probado en condiciones reales de campo y no solo en el laboratorio, **b) La posibilidad de determinar el porcentaje de error relativo a la técnica empleada, es decir, saber cuál es la tasa de error conocida o potencial para la metodología que se aplique**, c) La existencia de un control ejercido por otros expertos; *peer review* sobre la disciplina en cuestión, es decir, revisión por pares, d) La existencia de consenso general de la comunidad científica acerca de la validez de los planteamientos sobre los que se asienta y e) La necesidad de que exista una conexión directa entre la prueba y los hechos de los que trata el caso concreto, en sentido estricto, en ausencia

de alguno de los criterios descritos la evidencia no debiera ser considerada como científica (Alcoceba, 2018, García, 2016).

Cómo puede entenderse, los lineamientos antes descritos son aplicables a todas las disciplinas y ciencias forenses, sin embargo, el *Report Latent Fingerprint Examination del Forensic Science Assessments: A Quality and Gap Analysis* emite un análisis detallado de los fundamentos científicos para el examen de huellas latentes, identificando fortalezas y debilidades y haciendo sugerencias para futuras investigaciones, a pesar de que el reporte vira hacia el uso de huellas latentes, sus acotaciones son pertinentes para otro tipo de impresiones.

Uno de los aspectos en los que se hace mayor énfasis es en lo imperativo que resulta cambiar el lenguaje empleado en los reportes de los y las dactiloscopistas al emitir las conclusiones de sus análisis, es decir, como se mencionó en el apartado “Caracterización poblacional a partir de huellas dactilares” se debe mencionar que, en caso de un resultado de identificación positivo, se esperaría no observar el mismo arreglo de características en una impresión que viniera de una fuente diferente a la analizada, en lugar de realizar afirmaciones insostenibles como que el patrón de características en las dos impresiones provienen de la misma fuente, lo que se interpreta como la exclusión de todas las demás huellas posibles, sin embargo, una realidad es que si bien la literatura científica existente indica una baja probabilidad de que se impriman desde diferentes individuos un gran número de características comunes, no se proporciona una base adecuada para evaluar la rareza de cualquier rasgo particular que podría encontrarse en una impresión (Nagar, Choi y Jain, 2011), por lo tanto, no existe una base científica para estimar el número de personas que no pudiesen ser excluidas, y para determinar cuando el conjunto de posibles fuentes se limita a una sola persona (AAAS, 2017).

Lo cierto es que, incorporar éstas premisas a los análisis dactiloscópicos implica el desarrollo de investigaciones sobre las características de las huellas dactilares en varias poblaciones humanas a fin de obtener parámetros poblacionales y a partir del uso de herramientas estadísticas dotar a los resultados de identificación con una base cuantitativa sólida que permita emitir conclusiones en términos probabilísticos y no categóricos (PCAST, 2016), sólo de ésta manera podrá elevarse el escrutinio científico de la prueba dactiloscópica y

evitarse de manera definitiva los errores en las identificaciones, que como bien se ejemplifica, pueden tener consecuencias determinantes en la vida de las personas.

Error intraobservador

La dactiloscopia es una de las disciplinas forenses que utiliza el método de comparación de características para realizar la identificación de individuos, dentro de la metodología ACE-V en las fases de análisis y comparación pueden existir algunas variaciones dependientes del o la dactiloscopista que realice el estudio, lo que asocia un *error*, que puede ser consecuencia de diferentes factores, por ejemplo, la utilización de muestras que por cuestiones de calidad de imagen resulten en mediciones u observaciones desiguales, la identificación de falsas minucias, o simplemente, puede asociarse al factor del error humano que a su vez se vincula con aspectos como la experiencia de las y los dactiloscopistas y su capacidad de percepción, entre otros (NIST, 2012 y AAAS, 2017). Existen dos tipos de variaciones o sesgos relacionados a la medición u observación de un fenómeno, el error interobservador e intraobservador, el primero cuantifica las diferencias en observaciones de la misma característica entre dos o más individuos, mientras que el segundo evalúa la consistencia de dichas observaciones cuando éstas son registradas por un(a) solo(a) observador(a) sobre múltiples intentos (Orts, 2000), para fines de la presente investigación, nos centraremos únicamente en el error intraobservador.

La existencia de estos errores ha sido aprovechada por la ciencia para beneficio de los estudios, por ejemplo, cuando se requiere evaluar algún instrumento como un cuestionario, protocolo o metodología de investigación, se contempla el error asociado porque éste atenta contra la reproducibilidad y validez de los resultados al introducir un error aleatorio y otro sistemático. La validez tiene que ver con el instrumento si éste mide lo que debe medir, mientras que la precisión tiene que ver con cuánto se aproxima la medida al valor real de la magnitud. En ambos casos es siempre una cuestión valorativa, ya que, como se ha mencionado, no existen instrumentos totalmente precisos y válidos: hay sólo instrumentos más precisos y/o válidos que otros (Abraira, 2001).

Se dice que un instrumento o procedimiento es preciso si sus resultados son concordantes cuando se aplica más de una vez al mismo individuo bajo las mismas circunstancias. Dentro

de los análisis de concordancia se encuentra el Acuerdo Observado, el cual proporciona información sobre el grado de coincidencia en los valores asignados por el o los observadores en relación a la variable de estudio y al total de elementos que conforman la muestra, con la finalidad de determinar si el acuerdo entre las observaciones tiende al azar (Abraira, 2001). En éste sentido, dentro del ámbito científico, no sólo en la dactiloscopia, se han desarrollado diferentes maneras de medir éstos errores, para fines de los objetivos de la presente investigación nos concentramos en el error intraobservador, cuya herramienta más frecuente para calcularlo es el índice Kappa (González et. al., 2005; González-Rodríguez et. al., 2004; McHugh, 2012; Bernal et. al., 2004; Kamnikar, 2017 y Abraira, 2001). Para poder explicar en qué consiste éste índice hay que tener claro que la observación y la abstracción de datos son algunos de los pasos de cualquier metodología de investigación, cuando se realizan dos o más observaciones o mediciones de un mismo elemento por un sólo individuo u operador resulta coherente pensar que el acuerdo (la cantidad de veces que una medición es igual a otra) no presenta variabilidad, sin embargo, no siempre resulta de esta manera, dado que un MCC es un análisis de tipo observacional, donde la variabilidad entre las mediciones es mayor, es necesario contar con instrumentos estadísticos que midan de forma objetiva la relación entre las observaciones (McHugh, 2012).

Jacob Cohen en 1960 desarrolló una prueba estadística para medir la confiabilidad entre diferentes mediciones, partió de la hipótesis de que es probable que haya cierto nivel de acuerdo entre diferentes observaciones, aun cuando quien realice el análisis no se convenza de su elección o bien la deje al azar, por lo que diseñó el índice Kappa, mismo que funge como una herramienta que contempla la existencia de una concordancia o acuerdo aleatorio (McHugh, 2012).

Similar a los coeficientes de correlación, el índice Kappa puede variar de -1 a +1, donde 0 representa la cantidad de acuerdo que puede esperarse del azar y 1 representa el acuerdo perfecto entre los o las observadoras (McHugh, 2012; Cohen, 1960). Cohen sugirió que el resultado de los acuerdos se interprete de acuerdo a las categorías que se muestran en la Tabla 1, (McHugh, 2012; Cohen, 1960 y Abraira, 2001) de tal manera que en caso de obtenerse un Acuerdo de 0.90, se estaría ante una evaluación casi perfecta, por lo contrario, si se obtiene

un acuerdo categorizado como sin acuerdo o insignificante, estaríamos ante una evaluación cuyas observaciones tienden hacia el azar.

<i>Kappa (κ)</i>	<i>Grado de acuerdo</i>
0	<i>Sin acuerdo</i>
0.01-0.10	<i>Insignificante</i>
0.11-0.50	<i>Mediano</i>
0.51-0.75	<i>Moderado</i>
0.76-0.90	<i>Sustancial</i>
0.91-1.00	<i>Casi perfecto</i>

Tabla 1. Escala de valoración del Índice Kappa de Cohen (Landis y Koch, 1977).

Cómo la finalidad del índice Kappa es establecer el nivel de acuerdo entre las mediciones, dentro del contexto de las huellas dactilares para poder determinar si el tipo fundamental o el número de minucias observadas en un área específica, concuerda con lo señalado para la misma huella entre un primer y un segundo análisis, resulta pertinente aumentar el escrutinio del análisis del error intraobservador con un estadístico que permita conocer el grado de asociación entre los valores obtenidos para cada observación, en el caso específico de la presente investigación, se hace uso de otras herramientas estadísticas que miden la correlación como el Coeficiente de Spearman, ya que este permitió vislumbrar la relación libre de supuestos estadísticos como la normalidad entre el número de minucias observadas en las iteraciones. La prueba de correlación de rangos de Spearman (SRC) o Rho de Spearman es recomendable cuando los datos presentan valores extremos, o ante distribuciones no normales, ya que no es afectado por los cambios en las unidades de medida (Montes, 2004). El estadístico realiza una comparación del tamaño y el orden de los valores en una serie de datos, clasificándolos en función de sus intensidades dentro de su propia serie, la similitud entre las series enviadas se expresa a través del coeficiente de correlación que puede variar entre valores de -1 y $+1$. Cuanto mayor es el valor *Rho* más fuerte es la correlación, por lo contrario, cuanto más cerca está el valor de 0, es más débil (Forthofer, 2007) y se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$r_S = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

donde:

n = la cantidad de dactilogramas que se clasifican

d_i = diferencia entre rangos

Diversos autores han establecido escalas para la interpretación del *Rho de Spearman*, Hernández y Fernández (2014) en Mondragón (2014) sugirieron que el resultado se interprete de acuerdo a las categorías que se muestran en la Tabla 2:

<i>Valor del rango</i>	<i>Categoría</i>
0	No existe correlación
0.01-0.10	Débil
0.11-0.50	Media
0.51-0.75	Considerable
0.76-0.90	Muy fuerte
0.91-1.00	Perfecta

Tabla 2. Escala de valoración de la prueba de correlación de rangos Rho Spearman de Hernández y Fernández (2014) en Mondragón (2014).

Nunca hay 100% de certeza sobre los resultados de una investigación, incluso cuando se logra una significación estadística absoluta en las observaciones, por ejemplo, valores de 1.00 en el Acuerdo observado o en el coeficiente Rho, por lo que, para fines de una investigación, es importante que se establezca el grado de tolerancia para los valores obtenidos de los estadísticos que midan el error, por ejemplo, se recomienda que cuando el acuerdo es menor del 80%, se analicen las causas del mismo, ya que ese porcentaje indica que más del 20% de los datos que se analizan no son concordantes entre sí (Marusteri y Bacarea, 2010; McHugh, 2012), en el caso específico de las impresiones dactilares puede deberse a inconsistencias en la aplicación del método y/o ambigüedades en la identificación de minucias, entre otros factores.

La confiabilidad de la recopilación de datos es un componente primordial en la precisión de un estudio de investigación, existen fuentes potenciales de error en cualquier desarrollo metodológico y en la medida en que el o la investigadora los identifique, mida, reporte y minimice podrá aprovechar su existencia para beneficio de su estudio, ya que tendrá un mejor control del desarrollo de su metodología y sus resultados podrán ser expedidos con validez y confiabilidad.

Estadística descriptiva y multivariante

La estadística en general ha sido una herramienta auxiliar en el ámbito de la ciencia forense, específicamente para la dermatoglia y la dactiloscopia su aplicación no es nueva, estudios de décadas atrás (Champod 1995; Champod and Margot, 1996) han sido precursores de líneas de investigación que actualmente se están desarrollando; el comportamiento estadístico de varios tipos de minucias y tipos fundamentales a nivel poblacional, es quizá el enfoque más actual (Gutiérrez-Redomero, 2011, Rivaldería, 2017). Para el análisis de los datos, los y las investigadoras han empleado estadística descriptiva y multivariante.

La estadística descriptiva comprende la tabulación, representación y caracterización de una serie de datos que pueden ser cuantitativos o cualitativos. Sirve de herramienta para describir o resumir las propiedades de un conjunto de datos, además de estudiar la existencia de dependencia entre dos o más variables a partir de pruebas de hipótesis, lo anterior con la finalidad de que se obtenga la mayor cantidad de información sobre un fenómeno (Monroy, 2008; Fernández, et. al. 2002).

La estadística descriptiva se divide en univariante y bivariante, la primera contempla estadísticos de tendencia central (moda, mediana y media), de dispersión (rangos, varianza, desviación típica) de frecuencias (absoluta y relativa) y gráficos como diagrama de barras, histogramas, entre otros; por su parte, la estadística descriptiva bivariante se caracteriza por el cruzamiento de una o más variables de manera simultánea, las diferentes combinaciones resultantes forjan las bases de lo que se conoce como estadística multivariante (De la Puente, 2018). Para fines de la presente investigación se explicarán únicamente los estadísticos de frecuencias, análisis de componentes principales y mapas de color o *heatmaps*.

En relación a la frecuencia, debe entenderse como el resumen de una variable, de tal manera que se presenta el valor numérico de las veces en las que se repite, es decir, la cantidad de casos que hay por categoría. Existen diferentes tipos de frecuencias, la absoluta corresponde al número total de datos asignados a un elemento en una variable determinada, cuando ésta frecuencia se suma a otra se obtiene entonces la frecuencia absoluta acumulada, y es útil, por ejemplo, para resumir de manera sencilla la distribución de las frecuencias de una o más variables sin que exista pérdida de datos (Ross, 2007).

Una herramienta estadística que compara múltiples variables cuantitativas en un plano bidimensional es el gráfico polar, de araña, de estrella o de radar como también se conoce; a partir de él se puede observar qué variables tienen similitud o si presenta valores atípicos entre ellas, que son útiles para ver qué variables presentan valores altos o bajos dentro de un conjunto de datos, haciéndolos ideales para mostrar sus frecuencias, medias o medianas, según el fin que se tenga. A cada variable se le proporciona un eje que empieza en el centro, y se distribuye de forma radial, manteniendo la misma escala para todos los ejes. Las líneas de cuadrícula que se conectan de eje a eje a menudo se usan como guía para observar sus relaciones, cada valor máximo se traza a lo largo de su eje individual, mientras que, a su vez, todas las variables se interconectan para formar un polígono irregular que representa el perfil del conjunto total de datos como se muestra en la Imagen 15 (INEI, 2009).

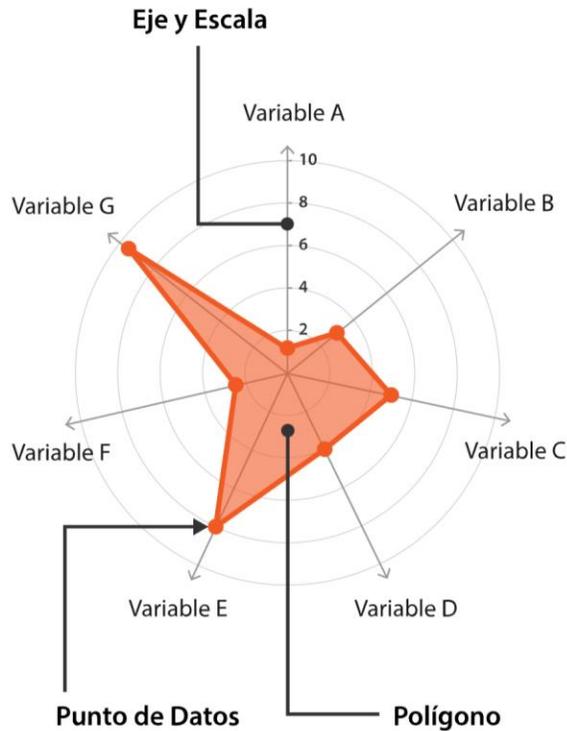


Imagen 15. Esquema de un gráfico polar (INEI, 2009).

Lo que respecta al Análisis de Componentes Principales (ACP), es uno de los diferentes métodos de análisis multivariante, su principal función es mostrar información sobre la relación existente entre variables en términos de interdependencia -que tanto se relacionan en su totalidad y cómo se comportan cuando se combinan entre sí (Jolliffe, 1972) -, a partir de la reducción de los datos, lo anterior con el fin de obtener el menor número de variables que expliquen mejor el fenómeno a estudiar, es decir, un ACP transforma el conjunto de datos originales en un cúmulo más pequeño, esto es producto de combinaciones lineales entre aquellas variables que contienen la mayor variación de la muestra, considerando aquellas que a nivel general aportan poca información, a los factores resultantes se les conoce como Componentes Principales (PC) (Díaz-Monroy, 2012). Un análisis de componentes principales tiene los siguientes objetivos: 1) Generar nuevas variables que puedan expresar la información contenida en el conjunto de datos, 2) Reducir la dimensionalidad del problema que se está estudiando, como paso previo para futuros análisis, y 3) Eliminar, cuando sea posible, algunas de las variables originales siempre que aporten poca variabilidad,

garantizando así la mínima pérdida de información (Francis y Will, 1999; Jolliffe, 1972 y Díaz-Monroy, 2012).

Los componentes principales satisfacen la condición de sintetizar en forma decreciente la varianza del conjunto original de datos, entiéndase como varianza a la medida de dispersión que se utiliza para representar la variabilidad de un conjunto de elementos respecto al promedio de los mismos, se calcula como la suma de los elementos elevados al cuadrado y divididos entre el total de datos (Jolliffe, 1972). Dentro de un ACP pueden determinarse los *eigenvalues* o "valores propios", éstos miden la cantidad de variación retenida en cada componente principal y son útiles para determinar el número de componentes a considerar dentro del análisis, por ende, si se desea hallar la combinación lineal que sintetice la máxima variabilidad del conjunto de datos, deberá tomarse en cuenta aquellos componentes principales con un número mayor de *eigenvalues* (Kassambara, 2017).

De igual manera, dentro de un ACP, puede conocerse que tanto contribuye una variable para explicar un componente principal, específicamente, las variables que están correlacionadas con el PC 1 (es decir, la Dimensión 1) y PC 2 (es decir, la Dimensión 2) son las más importantes para explicar la variabilidad del conjunto de datos, conocer ésta información permite eliminar aquellas variables que no aportan mucha información a fin de que puedan ser eliminadas para simplificar el análisis general (Kassambara, 2017). El gráfico que permite visualizar dicha información es el que se presentan en la Imagen 16, dónde en el *eje x* puede observarse el total de dimensiones o componentes principales y en el *eje y* el total de variables de estudio, la relación que se observa en este es que las variables cuyo punto se encuentre entre los componentes 1 y 2 tendrán mayor contribución, por lo contrario, a tamaños reducidos y tonalidades claras serán considerados con menor contribución. No obstante, las contribuciones de cada variable pueden variar en las dimensiones o componentes, por lo que se puede apreciar que en algunos casos existe una alta contribución de variables determinadas en dimensiones con menor representación de variabilidad.

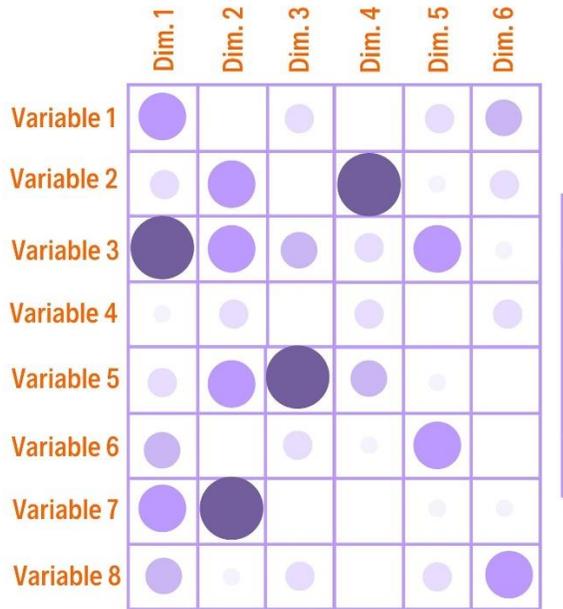


Imagen 16. Ejemplo de un gráfico de contribución de variables.

Una manera de inspeccionar simultáneamente la existencia de asociaciones entre filas, columnas y agrupamientos en una matriz de datos es a través del uso de herramientas estadísticas de visualización como los *heatmaps* o mapas de color (ver Imagen 17). Las asociaciones se observan en un área gráficamente compacta de dos dimensiones, permitiendo la visualización del fenómeno a partir de variaciones en la tonalidad e intensidad de color, mismas que se encuentran en función de la proporción del valor para cada variable y cada caso (Wilkinson y Friendly, 2009).

Generalmente, como se observa en la Imagen 17, se expresa en un conjunto de mosaicos rectangulares que constituyen una matriz de datos, que puede ser complementada con un clúster. Cada mosaico se encuentra sombreado en una escala de colores con el fin de representar el valor del elemento correspondiente dentro de la matriz de datos. Los mosaicos se ordenan de tal manera que las variables con comportamientos similares se encuentran cercanas entre sí, apreciándose en la proximidad de sus columnas. En los márgenes verticales y horizontales del gráfico de datos se encuentran árboles de conglomerados jerárquicos o clústers (Wilkinson y Friendly, 2009; Yi, 2021; Tiessen et. al. 2017) cuya finalidad es mostrar patrones de agrupamiento entre las dos variables analizadas bajo criterios de homogeneidad.

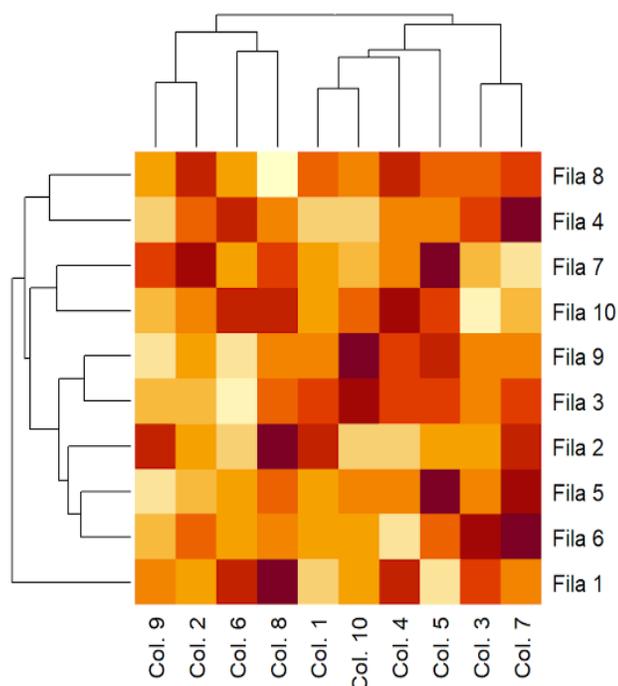


Imagen 17. Ejemplo de un gráfico de calor o *heatmap* (RStudio, 2022).

El propósito principal de los *heatmaps* es producir una representación gráfica y simplificada de la información proporcionada por una muestra que contiene una gran cantidad de datos, mostrando la relación simultánea entre filas y columnas en lo que se conoce como un *biplot* (diagrama de dispersión de dos variables), facilitando de esta manera el análisis y la detección de correspondencias entre variables (Kassambara, 2017).

En complemento a los análisis estadísticos descritos en éste apartado, existe una forma cuantitativa de analizar las relaciones (dependencia, normalidad, diferencia, entre otras) entre las variables de estudio a partir de la evidencia proporcionada por una muestra de datos; a ésta herramienta estadística se le conoce como *pruebas de hipótesis*. Dichas pruebas constan de plantear dos hipótesis contrarias, una conocida como Hipótesis nula de negación y otra como Hipótesis alternativa de afirmación, cada una se acepta o se rechaza en función de dos herramientas, el nivel de significancia y el valor p. El valor de significancia también denominado como alfa o α , es la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando es verdadera. Por ejemplo, un nivel de significancia de 0.05 indica un riesgo de 5% de concluir que existe una diferencia cuando en realidad no la hay, cómo puede observarse, es un

porcentaje muy bajo, lo que otorga mayor seguridad al tomar la decisión de rechazo o aceptación. Por su parte, el *valor p* o *p-value* como también se conoce, es la probabilidad de haber obtenido un resultado suponiendo que las variables de estudio no guardan una relación, para poder interpretar éstos valores se ha adoptado la regla estadística de que si el *valor p* cumple con la condición de ser menor que el nivel de significancia (comúnmente 0.05) se considera como un resultado estadísticamente significativo y, por lo tanto, permite rechazar la hipótesis nula de no relación, dejando así, la opción de seguir explorando las conexiones entre las variables. La significancia estadística es la probabilidad de que dicha relación no sea coincidencia, sino que en realidad sea causada por algún factor (Wasserstein y Lazar, 2016; Sterne y Smith GD, 2001).

Existen diferentes pruebas de hipótesis, el estadístico que se elija estará en función del diseño experimental del estudio, el tipo de datos, el número de variables y el fin mismo de la prueba. Para fines de la presente investigación se explicará brevemente las pruebas de U de Mann Whitney y Kruskal Wallis.

La prueba U de Mann-Whitney (también llamada de Mann-Whitney-Wilcoxon, prueba de suma de rangos Wilcoxon, o prueba de Wilcoxon-Mann-Whitney) es una prueba no paramétrica que resulta útil si tenemos dos muestras independientes, pocos datos o no se tiene una distribución normal en los mismos, a fin de saber si existe una diferencia entre las muestras. Para realizar la prueba se colocan las observaciones de las dos muestras en orden ascendente y se asigna un rango de manera que uno corresponde a la observación de menor magnitud, dos a la segunda, y así sucesivamente (Dietrichson, 2019). Luego se suman los rangos de cada muestra y se calcula el valor de U para cada una a partir de la siguiente fórmula:

$$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1$$

$$U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} - R_2$$

donde:

n_1 y n_2 = son los tamaños respectivos de cada muestra
 R_1 y R_2 = son las sumas de los rangos de cada muestra

Como resultado se tomará el valor más pequeño para el estadístico U , cuyo valor será interpretado como el p -value para la toma de decisión respecto a las hipótesis correspondientes.

Lo que respecta a la prueba de Kruskal-Wallis, también conocido como test H , es una prueba no paramétrica considerada una extensión de la prueba U de Mann Whitney, útil en casos donde no haya una distribución normal en los datos y donde se pretenda encontrar diferencias significativas entre dos o más variables o muestras, la prueba consiste en una asignación y suma de rangos semejante al estadístico U de Mann Whitney, el valor K responde a la siguiente fórmula:

$$K = (N - 1) \frac{\sum_{i=1}^g n_i (\bar{r}_i - \bar{r})^2}{\sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^{n_i} (r_{ij} - \bar{r})^2}$$

donde:

n_i = es el número de observaciones

r_i = es el rango por observación y por grupo

N = número total de observaciones entre todos los grupos

A partir del p -value que arroje se deberá evaluar si existen diferencias, en caso de que así sea, lo ideal sería conocer qué grupos o variables las están presentando a partir de pruebas *POST HOC* (Amat, 2016), para lo que se puede hacer uso de estadísticos complementarios como el Pairwise Wilcoxon Rank Sum Tests, el cual permite realizar comparaciones por pares entre las variables a fin de localizar las que proporcionan información adicional sobre diferencias estadísticamente significativas (Kassambara, 2019).

Con la información expuesta en éste marco teórico, se busca dejar claro que la dactiloscopía ha sido históricamente reconocida como una disciplina idónea -ya sea dentro de contextos de búsqueda de personas como en procesos penales que involucren una responsabilidad legal- para el establecimiento de la identidad de una persona. Después de todas las ideas desarrolladas a lo largo de éste trabajo resulta reduccionista decir que la identificación, es el acto de establecer una identidad (Thompson, T., Black, S., 2007) ya que, específicamente dentro de la dactiloscopía, el análisis no es y no debe entenderse únicamente cómo una comparación manual (1:1). Como hemos visto, la ciencia forense no es infalible, y al tratar con datos sensibles como lo son las huellas dactilares, es necesario que el proceso de identificación vaya más allá de sólo establecer la identidad, resulta indispensable cómo personas de ciencia cuestionar las metodologías y los resultados de los análisis, no con el fin de desmeritar el trabajo realizado por los y las investigadoras a lo largo del tiempo, sino con la finalidad de robustecer los procesos de identificación a partir de la incorporación de nuevas perspectivas en el ámbito forense como la antropológica y la dactiloscopológica, contemplando de igual manera, los diferentes recursos que se tienen en la actualidad, como lo son los biométricos dactilares de apoyo, las bases de datos y las herramientas estadísticas que sin duda han sido de gran utilidad en investigaciones de corte poblacional; con la sinergia de todos estos elementos se busca favorecer el desarrollo de metodologías basadas en evidencia que impacten los procesos de identificación a fin de ofrecer una solución a largo plazo al problema de la evaluación del valor probatorio de la prueba cuyo indicio es la huella dactilar.

METODOLOGÍA

Se trabajó con una muestra retrospectiva -disociada de la identidad de las personas donantes- del 2018 de biométricos dactilares donada, con fines de investigación, por la Dirección General de Administración Escolar (DGAE) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) al área de Dactiloscopía del Laboratorio de Antropología y Odontología Forense (LAOF) de la Licenciatura en Ciencia Forense de la Facultad de Medicina de la UNAM, dicha muestra se encuentra conformada por 49,000 dactilogramas, correspondientes a los dedos pulgares derecho e izquierdo de 24,500 individuos, pertenecientes a población mexicana con un rango de edad de 18 a 23 años. Derivado a la extensa magnitud de la base total de dactilogramas, se procedió a preseleccionar aquellos que cumplieran con los criterios de exclusión e inclusión en función de la cantidad y calidad de información que proporcionaban, mismos que se describen en la Imagen 18.

Una vez obtenidos los dactilogramas, se procedió a seleccionar el tamaño de la muestra específica para la presente investigación, misma que se calculó en función del total de individuos con un nivel de confianza al 95% y un margen de error admisible del 5%, siempre considerado que al menos de 75% de población total cumpliera con los criterios de inclusión, dando un total de 285 unidades muestras, cifra que se redondeó a 300 individuos con base al margen superior del error admisible de la muestra pertenecientes a población mexicana en una proporción 1:1 respecto al sexo, es decir, se cuentan con 150 hombres y 150 mujeres, lo que se traduce en un total de 600 biométricos dactilares de impresión plana o de apoyo. Ésta selección se hizo a partir de los siguientes criterios de inclusión:

1. Todos los individuos seleccionados pertenecen a la Ciudad de México.
2. La muestra de cada individuo se conforma de ambos dedos pulgares (izquierdo y derecho).
3. La presencia de cicatrices no excluía al dactilograma, en vista de que ésta característica es un elemento individualizante.
4. Derivado que, en el caso de verticilos algunos dactilogramas presentaban claramente el núcleo, por ende, podían catalogarse dentro de éste tipo fundamental, se dio

prioridad a tomar aquellos que presentarán al menos uno de los dos deltas característicos.

5. En el caso del tipo fundamental presilla, en todos los dactilogramas se observa un delta y el flujo general de las crestas que podría presentarse completo o incompleto.
6. Respecto al arco, únicamente se fijó el criterio de presencia de los dos sistemas crestaes (basilar, marginal).



Imagen 18. Diagrama de los criterios de exclusión e inclusión para la selección de la muestra.

Es importante aclarar que, una vez obtenidos los 600 dactilogramas, se procedió a asignarle a cada uno un código de pseudo-anonimización, es decir los dactilogramas fueron disociados del nombre a quien le pertenecen, quedándose únicamente con una clave numérica única para cada dactilograma, lo anterior con la finalidad de garantizar la protección de datos personales

a partir del estricto apego al uso de las variables de interés y en función de los objetivos particulares de ésta investigación.

Análisis de la muestra

Para el análisis de la muestra se aplicó el “Protocolo de análisis de impresiones dactilares” que se encuentra en desarrollo en la línea de investigación en Lofoscopia en el Laboratorio de Antropología y Odontología Forense (LAOF) de la UNAM, mismo que parte de la metodología propuesta por Gutiérrez-Redomero et. al. (2008). Los biométricos dactilares se trabajaron a partir de archivos en formato WSQ con una resolución de 500 ppi y un tamaño de 15.3 KB, éstas fueron ingresadas al programa digital *Photoshop versión 21.2.1* dónde se convirtieron en un archivo PSD con una resolución de 300 ppi y un tamaño de 483 KB.

Una vez abierto el biométrico en el programa digital *Photoshop* se trazó un plano cartesiano y una circunferencia con un radio de 15 crestas con respecto al eje x (al centro del dactilograma) de tal manera que quedará dividido en ocho subcuadrantes, tal como se ilustra en la Imagen 19, correspondientes a: Distal Izquierdo Fuera (DIF), Distal Izquierdo Dentro (DID), Distal Derecho Fuera (DDF), Distal Derecho Dentro (DDD), Proximal Derecho Fuera (PDF), Proximal Derecho Dentro (PDD), Proximal Izquierdo Fuera (PIF) y Proximal Izquierdo Dentro (PID).



Imagen 19. Dactilograma con las abreviaciones correspondientes a cada subcuadrante.

Una vez realizado lo anterior y con la finalidad de evitar la identificación de falsas minucias, se procedió a efectuar el trazado (pintado) de líneas albudactilares y cicatrices según se presentarán, a manera de ejemplo se muestran las Imágenes 20 y 21.



Imagen 20. Dactilograma con el marcaje de una cicatriz.

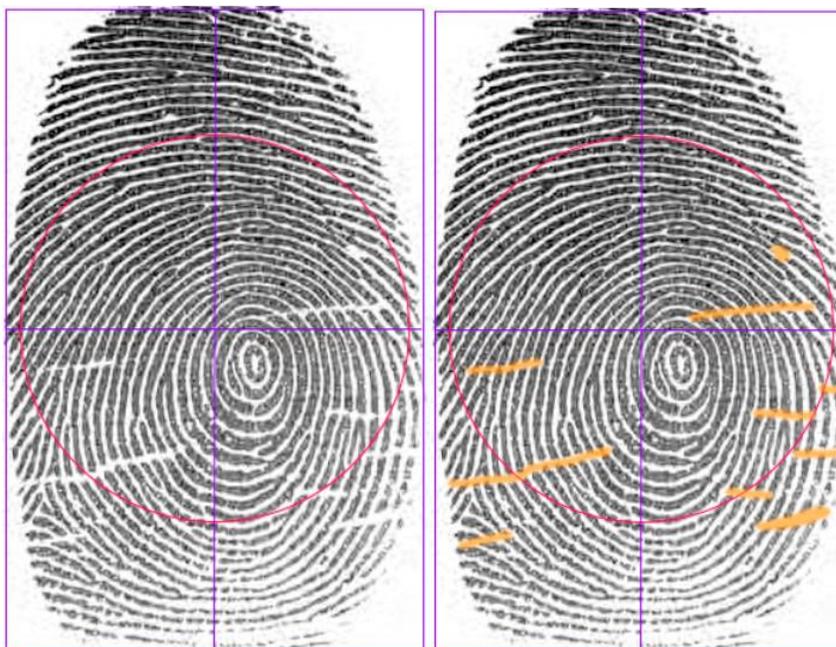


Imagen 21. Dactilograma con el marcaje de líneas albedactilares.

En seguida se llevó a cabo la clasificación del tipo fundamental con base en el sistema Vucetich: Arco, Presilla Interna, Presilla Externa y Verticilo, seguido de la identificación, localización, trazado en color, conteo y registro por subcuadrantes de los 15 tipos de minucias ilustradas en la Tabla 3, a manera de ejemplo de un biométrico analizado se muestra la Imagen 22.

MINUCIAS			
MINUCIA	FIGURA	MINUCIA	FIGURA
TRANSVERSAL		"M"	
BIFURCACIÓN		DESVIACIÓN	
TRIFURCACIÓN		ISLOTE	
SECANTE		VUELTA	
CORTADA		PUNTO INTRACRESTAL	
ENCIERRO		PUNTO INTERCRESTAL	
INTERRUPCIÓN		EMPALME	
CUÑA			

Tabla 3. Código de color para cada uno de los tipos de minucias considerados para el análisis.

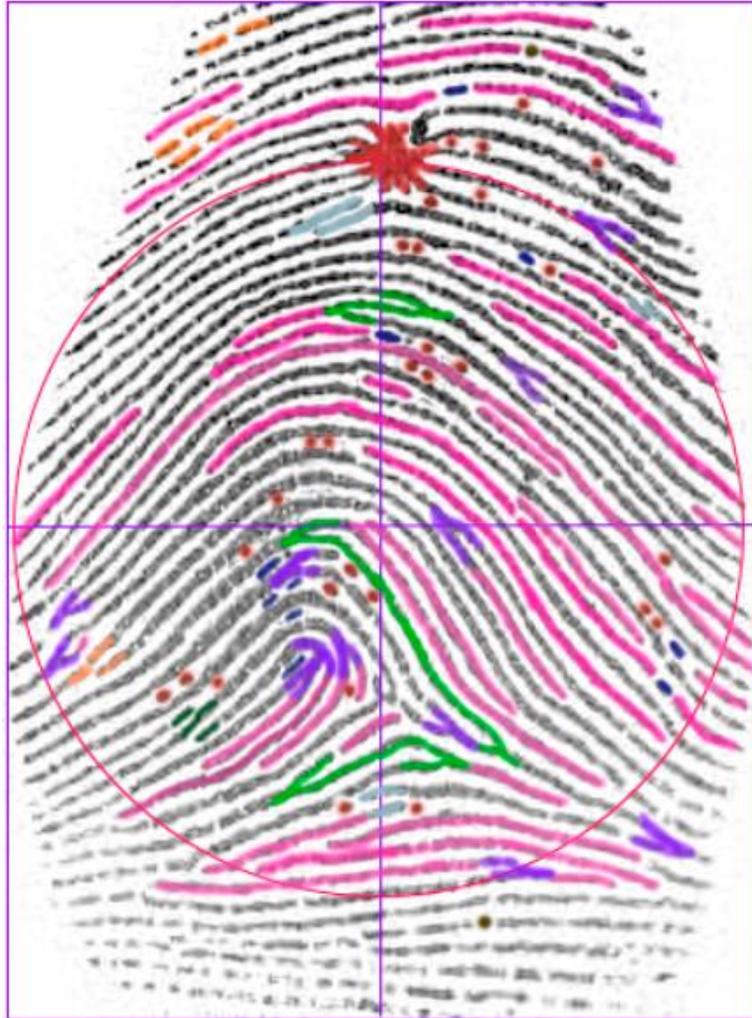


Imagen 22. Ejemplo de la identificación, localización y trazado en color de las minucias presentes en un dactilograma.

Determinación del error intraobservador

Para la determinación del error intraobservador se eligieron 30 individuos al azar, equivalentes a 60 dactilogramas, lo que corresponde al 10% de la muestra seleccionada. Se les realizó dos aplicaciones del protocolo con una diferencia de quince días entre cada toma (iteración uno y dos), con la finalidad de evitar el reconocimiento memorizado de las minucias o los tipos fundamentales para estos dactilogramas en específico.

Una vez obtenidos los datos correspondientes a las frecuencias de las minucias para las dos iteraciones, se analizaron los resultados con ayuda del software estadístico *R Studio* (Versión

1.4.17.17, 2021) que es una herramienta de uso libre que permite realizar distintos cálculos estadísticos, así como generar gráficas y figuras de gran calidad (Rodríguez, 2019).

El estadístico empleado para el análisis de los datos fue el Acuerdo Observado, el cual es parte fundamental para el cálculo del Índice Kappa, que evalúa los valores registrados de las minucias observadas para el individuo uno en la primer iteración y compara estadísticamente con los valores registrados para el mismo individuo pero en una segunda iteración, el puntaje obtenido fue comparado y clasificado bajo la escala de intervalos propuesta por Jacob Cohen (1960) del Índice kappa a fin de determinar el nivel de concordancia entre ambas mediciones, simultáneamente, se hizo uso del estadístico *Rho Spearman* que se empleó a fin de conocer el grado de asociación entre ambas iteraciones, ya que indica el nivel de similitud que tienen los conteos de cada minucia durante las dos aplicaciones realizadas.

Caracterización muestral

El análisis estadístico para la caracterización muestral se dividió en dos. El primero abarca la estimación de la prevalencia del tipo fundamental (Arcos, Presillas internas y externas y Verticilos) en función del sexo (Hombre y Mujer) y el dedo (Pulgar izquierdo y derecho), para lo que se hizo uso de estadística descriptiva (frecuencias).

El segundo análisis corresponde a la determinación de la variabilidad del tipo de minucia a partir del sector anatómico dactilar o subcuadrante, del tipo fundamental y del sexo:

- Para la variable del sector anatómico dactilar, se utilizó estadística descriptiva (frecuencias), dando como resultado gráficos polares para cada uno de los subcuadrantes (DIF, DID, DDF, DDD, PDF, PDD, PIF, y PID) además de observar la variabilidad de minucias por zonas (Central y Periférica).
- Para la variable del tipo fundamental se empleó estadística descriptiva bivariante, dando como resultado cuatro *heatmaps* correspondientes a cada uno de los patrones dactilares estudiados: Arco, Presilla interna, Presilla externa y Verticilo. Para fines de extraer la mayor cantidad de información, se realizaron adicionalmente la división por sexo para cada uno de los tipos fundamentales, obteniendo así ocho *heatmaps*

independientes. A partir de los datos obtenidos se procedió a usar los estadísticos Kruskal Wallis y el Pairwise Wilcoxon Rank Sum Tests a fin de identificar el comportamiento de los tipos de minucias en cada tipo fundamental.

- Para la variable del sexo se empleó la estadística descriptiva bivariante, dando como resultado dos Análisis de Componentes Principales (ACP), uno para hombres y uno para mujeres. A partir de los datos obtenidos se procedió al empleo del estadístico U de Mann Whitney a fin de conocer si existían diferencias estadísticamente significativas entre sexos respecto a cada tipo de minucia.

RESULTADOS

Error intraobservador

El error intraobservador con el que se analizó la muestra se determinó a partir del cálculo del Acuerdo Observado en conjunto del coeficiente de correlación de Spearman (Rho de Spearman), estos se evaluaron por individuo para los pulgares derecho e izquierdo como se muestran en la Tabla 4.

<i>Individuo</i>	<i>Pulgar Derecho</i>			<i>Pulgar Izquierdo</i>		
	<i>Acuerdo</i>	<i>Acuerdo Observado</i>	<i>Rho</i>	<i>Acuerdo</i>	<i>Acuerdo Observado</i>	<i>Rho</i>
<i>Ind1</i>	110	0.9167	0.9604	113	0.9417	0.9023
<i>Ind2</i>	103	0.8583	0.7528	110	0.9167	0.8462
<i>Ind3</i>	113	0.9417	0.8517	110	0.9167	0.8744
<i>Ind4</i>	108	0.9	0.7529	105	0.875	0.871
<i>Ind5</i>	106	0.8833	0.7834	107	0.8917	0.8069
<i>Ind6</i>	114	0.95	0.8998	110	0.9167	0.7476
<i>Ind7</i>	100	0.8833	0.7206	103	0.8583	0.8097
<i>Ind8</i>	90	0.75	0.3917	113	0.9417	0.8941
<i>Ind9</i>	113	0.9417	0.8925	119	0.9917	0.9793
<i>Ind10</i>	112	0.9333	0.8961	111	0.925	0.9283
<i>Ind11</i>	113	0.9417	0.8687	112	0.9333	0.9187
<i>Ind12</i>	108	0.9	0.842	110	0.9167	0.9064
<i>Ind13</i>	107	0.8917	0.8897	102	0.85	0.7948
<i>Ind14</i>	104	0.8667	0.7738	102	0.85	0.7871
<i>Ind15</i>	106	0.8833	0.7679	107	0.8917	0.9017
<i>Ind16</i>	110	0.9167	0.9316	116	0.9667	0.9459
<i>Ind17</i>	112	0.9333	0.8303	107	0.8917	0.8793
<i>Ind18</i>	125	0.9583	0.9737	111	0.925	0.8208
<i>Ind19</i>	101	0.8417	0.7204	103	0.8573	0.7495
<i>Ind20</i>	110	0.9167	0.8562	96	0.8	0.6338
<i>Ind21</i>	97	0.8083	0.6602	102	0.85	0.6791
<i>Ind22</i>	110	0.9167	0.8722	101	0.8417	0.7867
<i>Ind23</i>	108	0.9	0.8041	108	0.9	0.6609
<i>Ind24</i>	111	0.925	0.8226	115	0.9583	0.8359
<i>Ind25</i>	119	0.9917	0.9593	115	0.9583	0.922
<i>Ind26</i>	111	0.925	0.8608	107	0.8917	0.7083
<i>Ind27</i>	108	0.9	0.9185	109	0.9083	0.859
<i>Ind28</i>	106	0.8833	0.6989	108	0.9	0.791
<i>Ind29</i>	105	0.875	0.6882	110	0.9167	0.7826
<i>Ind30</i>	103	0.8583	0.787	110	0.9167	0.8542

Tabla 4. Valores del Acuerdo Observado y Rho Spearman para el pulgar derecho e izquierdo respectivamente.

En la Tabla 4 para cada pulgar se encuentran tres columnas que corresponden al Acuerdo, Acuerdo Observado y Rho, la primera representa las veces que coincidieron los valores para

cada uno de los subcuadrantes, es decir, cuántas de las casillas tuvieron el mismo valor, siendo el total de posibles coincidencias 120, éste número deviene de los 15 tipos de minucias establecidas en la metodología multiplicado por los 8 subcuadrantes del dactilograma. El acuerdo observado se obtiene de la división del número de coincidencias para cada individuo entre las 120 posibles, generando el valor que es directamente comparable con la escala de medición del índice Kappa (ver Tabla 1). En lo que refiere a la tercera columna, el Rho indica los valores de correlación obtenidos para los 60 dactilogramas, mismo que se obtienen de ordenar de menor a mayor los datos de cada una de las dos observaciones de manera que 1 corresponde a la observación de menor magnitud, 2 a la segunda, y así sucesivamente (clasificación de rangos), para después restar el rango de la primer observación menos el rango de la segunda para el mismo dactilograma, elevarlos al cuadrado, y sumarlos en su totalidad, éste último valor es ingresado al estadístico del Coeficiente Rho Spearman y el resultado se interpreta de acuerdo a la escala de medición de elección (ver Tabla 2).

Los valores obtenidos del Acuerdo Observado se encuentran en el Gráfico 1 que parte de los valores reportados en la Tabla 4, donde puede observarse que el rango entre ellos, tanto para el pulgar izquierdo como para el derecho oscila entre 0.75 a 0.99. Cómo ya se mencionó en el capítulo “Análisis estadísticos”, para fines de interpretación, entre más cercano a 1 sea el valor del Acuerdo Observado, mayor concordancia entre las dos mediciones realizadas hay. Referente al pulgar izquierdo se obtuvo un 97% de valores en la categoría de “casi perfecto” y “perfecto” (29 dactilogramas), y un 3% en la categoría de “considerable” (1 dactilograma), mientras que para el pulgar derecho se obtuvo un 93% en la categoría de “casi perfecto” y “perfecto” (28 dactilogramas) y un 7% en la categoría de “considerable” (2 dactilogramas). En suma, 57 de los 60 dactilogramas obtuvieron valores que encuadran dentro de la categoría de “casi perfecto-perfecto” representando un 95% del acuerdo en general.

Los valores obtenidos del coeficiente de correlación de Spearman se encuentra en el Gráfico 2 que parte de los valores reportados en la Tabla 4, donde se observa tanto para el pulgar izquierdo como para el derecho valores que oscilan entre 0.3917 a 0.9793. Cómo se explicó anteriormente entre más cercano a 1 sea el valor Rho, mayor asociación entre las dos mediciones hay. Referente al pulgar derecho se obtuvo un 17% de valores en la categoría

“perfecta” (5 dactilogramas), un 67% en la categoría “muy fuerte” (20 dactilogramas), un 13% en la categoría “considerable” (4 dactilogramas) y un 3% en la categoría “media” (1 dactilograma), mientras que para el pulgar izquierdo se obtuvo un 17% en la categoría de “perfecta” (5 dactilogramas), un 64% en la categoría “muy fuerte” (19 dactilogramas) y un 20% en la categoría “considerable” (6 dactilogramas). En suma, 49 de los 60 dactilogramas obtuvieron valores que encuadran dentro de las categorías “perfecta” y “muy fuerte” representando un 82% de la asociación en general.

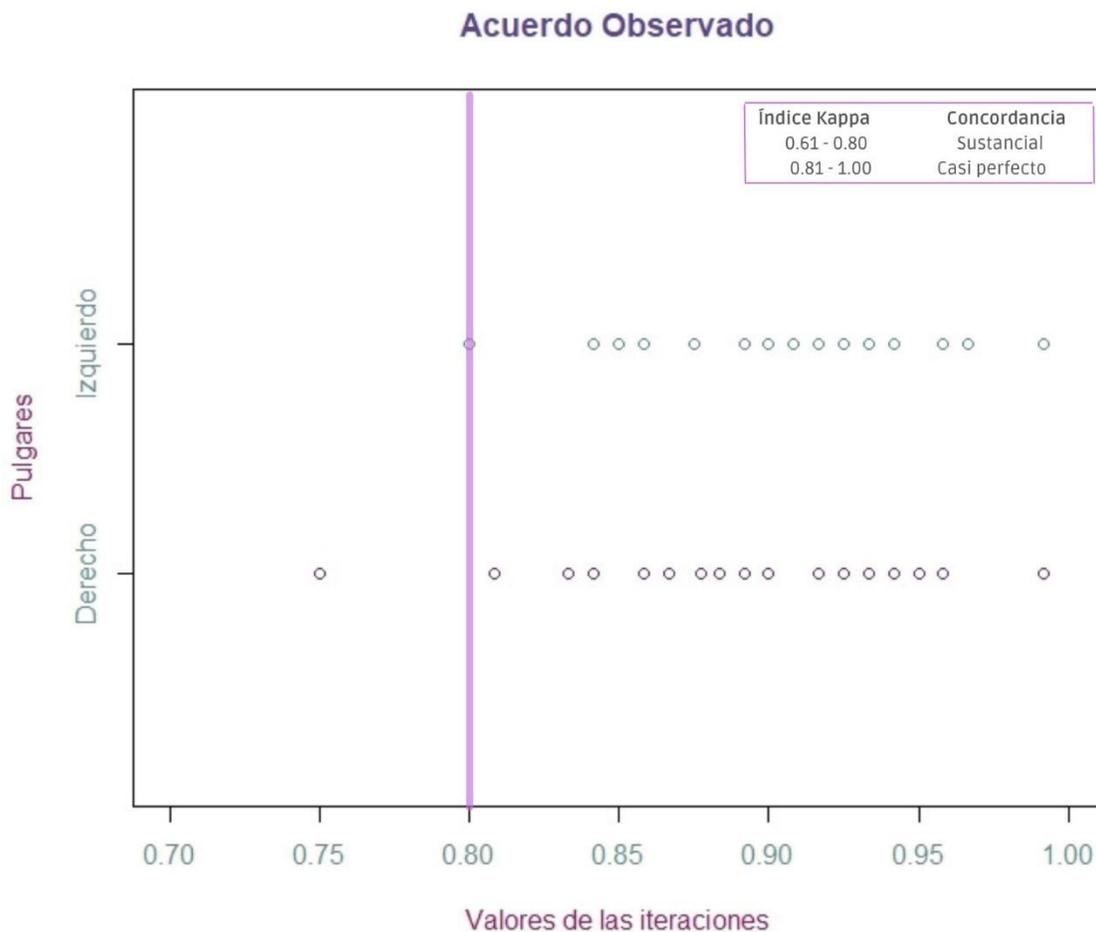


Gráfico 1. Distribución de los valores del Acuerdo Observado para los pulgares (derecho e izquierdo), en la esquina superior derecha se presentan los rangos correspondientes al criterio considerado del Índice Kappa.

Coeficiente de correlación de Spearman Rho

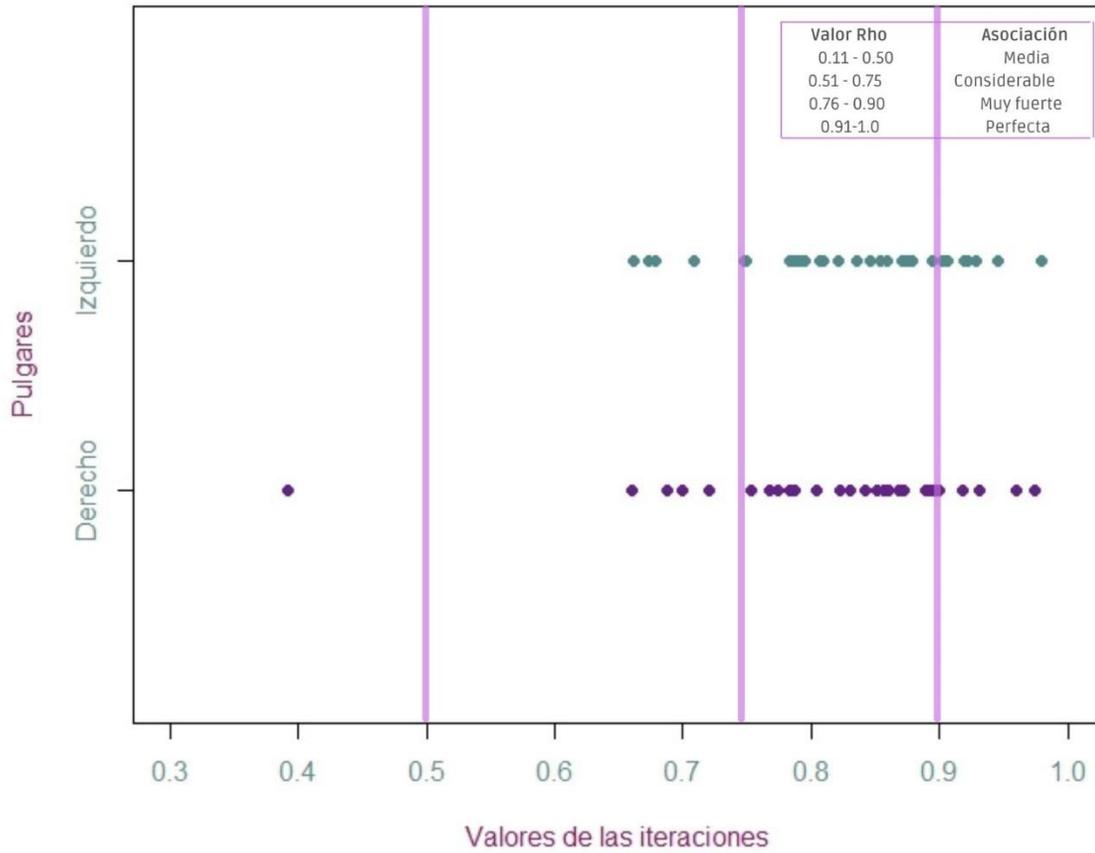


Gráfico 2. Distribución de los valores obtenidos del Rho Spearman para ambos pulgares, en la esquina superior derecha se observan los rangos correspondientes a la escala propuesta por Rodríguez y Fernández en Mondragón (2014).

Caracterización muestral

Distribución de frecuencias del tipo fundamental

Para determinar la frecuencia de tipo fundamental se establecieron dos variables, el sexo (Hombres y Mujeres) y la homología del pulgar (Izquierdo y Derecho). En el Gráfico 3 se observa la distribución de frecuencias para la variable de sexo, donde el **Verticilo** es el que **mayor prevalencia de aparición** tiene con un total de 252 (42%), **seguido de Presilla Externa** con 149 (25%), **Presilla Interna** con 127 (21%) (sumando un total de **276 para ambas** (46%) y **Arco** con 75 (12%). De manera general, no se observan diferencias entre las frecuencias de los tipos fundamentales por sexos en la muestra evaluada (nT=600 dactilogramas), de la que se presenta una diferencia general mínima de ± 2 y máxima de ± 3 dactilogramas.

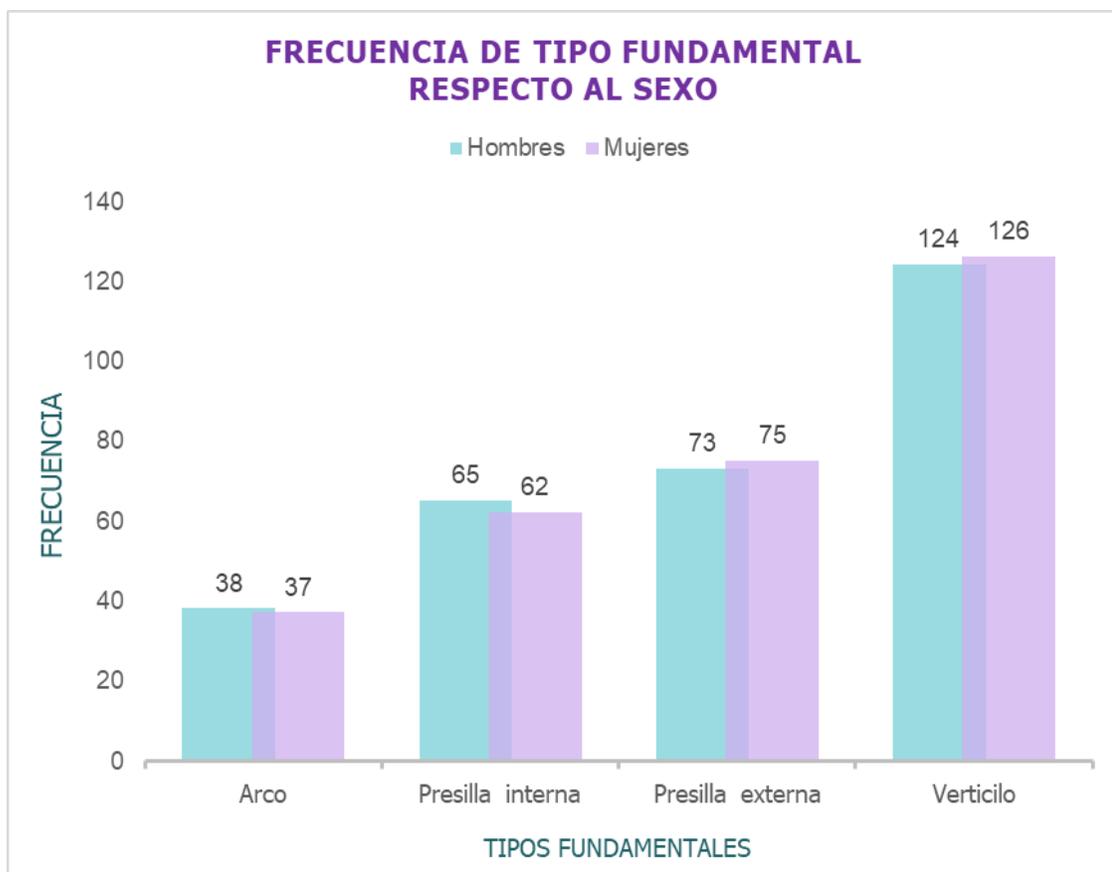
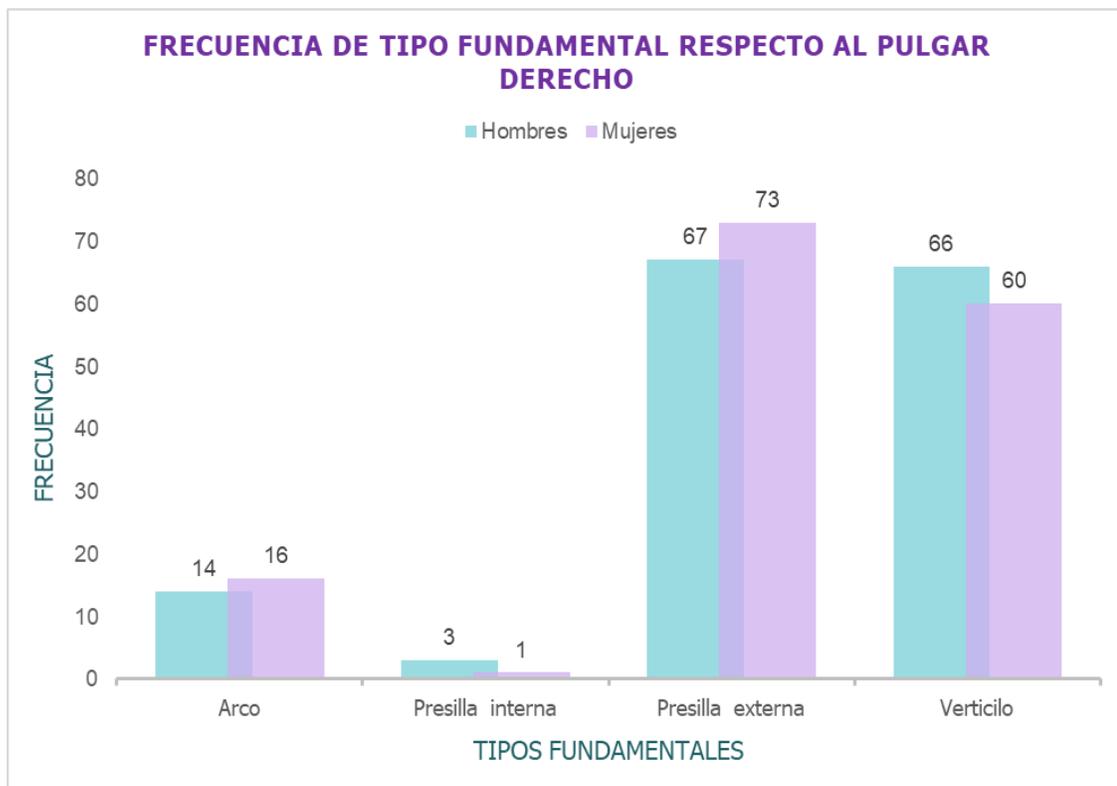


Gráfico 3. Distribución de frecuencias de los tipos fundamentales divididas por sexo para el total de la muestra.

En el Gráfico 4 se muestran las frecuencias observadas para la variable **Pulgar derecho** (**nD=300 dactilogramas**), donde se observa una **mayor prevalencia** del tipo fundamental **Presilla Externa (47%)**, seguido de **Verticilo (42%)**, **Arco (10%)** y **Presilla Interna (1%)** respectivamente. De manera particular, el **Pulgar derecho** presenta una diferencia considerable entre presillas, siendo la **externa la más frecuente (140 dactilogramas)** respecto a la interna (4 dactilogramas). Además, se presenta mayor cantidad total de Presillas externas en toda la distribución de los tipos fundamentales conformada aproximadamente de forma equitativa para ambos sexos.



Gráfica 4. Distribución de frecuencias de tipos fundamentales para el pulgar derecho divididos por sexo.

En lo que respecta al **Pulgar izquierdo** (nI=300 dactilogramas), en el Gráfico 5 se observa una **mayor prevalencia del tipo fundamental Verticilo (41%), seguido de Presilla Interna (41%), Arco (15%) y Presilla Externa (3%)** respectivamente. De manera particular se presenta una diferencia considerable entre presillas, donde al contrario del pulgar derecho, la presilla interna es la más frecuente (123 dactilogramas) respecto a la externa (8 dactilogramas). En relación a la distribución general de los tipos fundamentales se observa nuevamente que en el Pulgar izquierdo existe una distribución proporcional del sexo, siendo el verticilo el 1.66% (n=5 dactilogramas) superior al de la presilla interna en el sexo femenino.

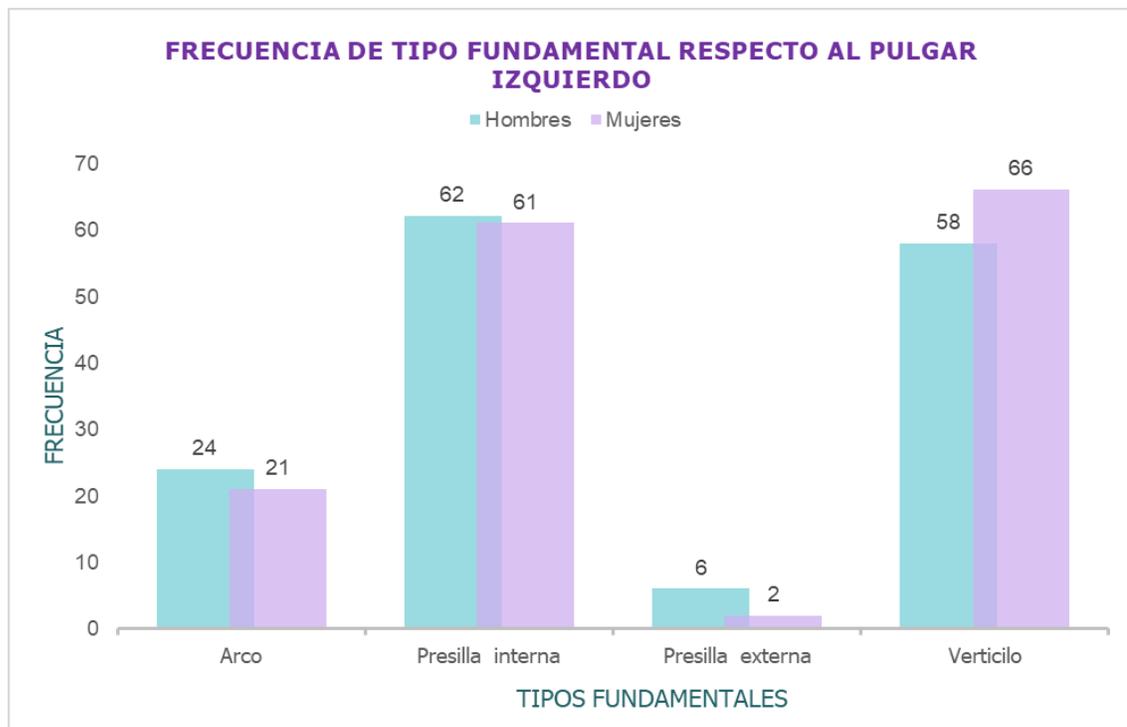


Gráfico 5. Distribución de frecuencias de tipos fundamentales para el pulgar izquierdo divididos por sexo.

Variabilidad de los diferentes tipos de minucias

Cómo se desarrolló en la metodología, para la localización, identificación y cuantificación de variabilidad de minucias se utilizaron 15 tipos: Cortadas (Cort), Bifurcaciones (Bif), Puntos Intracrestales (Pintra), Encierro (Enc), Islothe (Islo), Empalme (Empal) Interrupciones (Interr), Desviaciones (Desv) Transversales (Trans), Cuña (CU), Puntos Intercrestales (Pinter), Secantes (Sec), M (M), Vuelta (Vuel) y Trifurcaciones (Tri). Éstas fueron analizadas en sectores específicos del dactilograma nombrados subcuadrantes: Distal Izquierdo Fuera (DIF), Distal Izquierdo Derecho (DID), Distal Derecho Fuera (DDF), Distal Derecho Dentro (DDD), Proximal Derecho Fuera (PDF), Proximal Derecho Dentro (PDD), Proximal Izquierdo Fuera (PIF), Proximal Izquierdo Derecho (PID) y las zonas correspondientes a la circunferencia y la periferia (ver Imagen 23).



Imagen 23. Representación de los subcuadrantes del dactilograma.

Para explorar la variabilidad de los tipos de minucias en la población se establecieron tres variables, el sector anatómico dactilar o subcuadrante (DIF, DID, DDF, DDD, PDF, PDD, PIF, PID), el tipo fundamental (Verticilos, Arcos, Presilla Interna y Presilla Externa) y el sexo (Hombres y Mujeres).

Variabilidad por sector anatómico dactilar

Todos los tipos de minucias fueron identificados a lo largo del análisis, cuantificando un total de 35,010 para toda la superficie de los dactilogramas (nT=600 dactilogramas), donde las Cortadas obtuvieron la mayor frecuencia con un total de 13,532 registros, mientras que las Trifurcaciones fueron las de menor cantidad de registros obtenidos con un total de 75 registros (Ver Tabla 1; Anexo).

En la Imagen 23 puede observarse la distribución del total de minucias en función de las zonas central y periférica del dactilograma (ver Tabla 2; Anexo). En la zona central se encontraron un total de 19,674 minucias, mientras que en la zona de la periferia un total de 15,336 (ver Imagen 24.a), lo que indica una **mayor frecuencia dentro de la circunferencia**, siendo el **sexo masculino** el que presentó **mayor afluencia de minucias para ambas zonas** (ver Imagen 24.b).

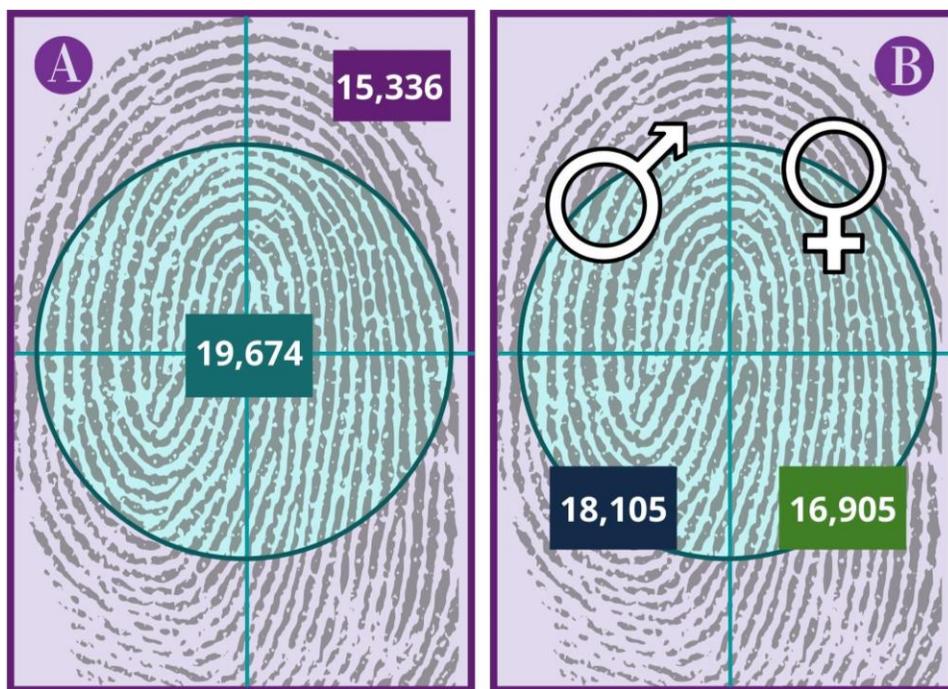


Imagen 24. Distribución de minucias en el dactilograma: a) Total de minucias identificadas y cuantificadas para la zona central (azul) y la zona de la periferia (morado); y b) Total de minucias por sexo.

Se obtuvieron los totales de minucias por subcuadrante y por zona (ver Tabla 3; Anexo), donde se puede observar que, la **mayor cantidad de minucias se encuentran ubicadas en los subcuadrantes proximales** PDF, PDD, PIF y PID (Ver Imagen 25).



Imagen 25. Total de minucias identificadas y cuantificadas por cada subcuadrante del dactilograma (DIF, DID, DDF, DDD, PDF, PDD, PIF, PID).

No deben confundirse los datos presentados que corresponden a las cantidades totales de minucias con la variabilidad de ellas, aunque conocer las frecuencias que se muestran en la Imagen 24 aporta información relevante para la caracterización muestral, profundizar en el comportamiento específico de cada tipo de minucia permite una mejor comprensión de su distribución, por lo anterior, se emplearon gráficos polares cuyos resultados se muestran a continuación.

En los Gráficos 1-8 del Anexo se encuentran las gráficas correspondientes a cada subcuadrante del dactilograma, sin embargo, para fines de interpretación se agruparán en aquellos que pertenecen a la zona central y a la zona de la periferia.

En el Gráfico 6 se presenta la variabilidad de tipos de minucias para los subcuadrantes (DID, DDD, PDD y PID) correspondientes a la **zona central** del dactilograma, donde la

Bifurcación y la Cortada tuvieron una prevalencia mayor respecto a los demás tipos de minucias en función de las frecuencias de registros, seguido del **Punto Intercrestal**, el **Empalme** y el **Encierro**. En lo que refiere al Gráfico 7 se muestran los subcuadrantes (DIF, DDF, PDF y PIF) pertenecientes a la zona de la **periferia**, donde la **Cortada** presenta una **frecuencia mayor** respecto a los demás tipos de minucias, **seguido de las Bifurcaciones y Encierros**.

En comparativa de los Gráficos 6 y 7 se tiene que las minucias más representativas para ambas zonas del dactilograma son las bifurcaciones y las cortadas, sin embargo, entre ellas se observa que **las cortadas tienen mayor frecuencia en los subcuadrantes proximales de la periferia (PDF y PIF)**.

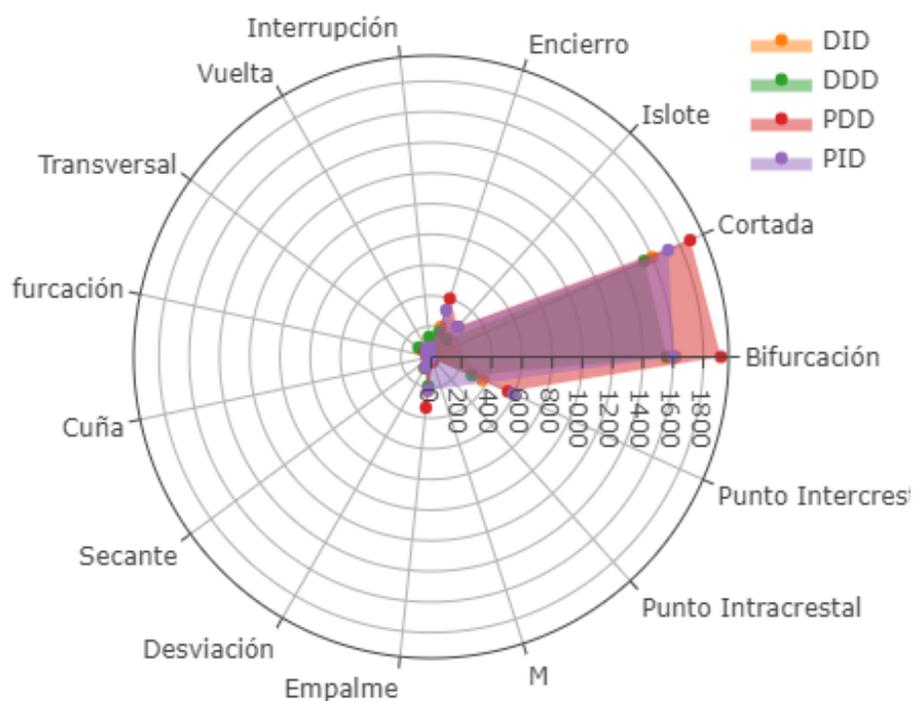


Gráfico 6. Gráfico polar de la frecuencia de cada tipo de minucia en los subcuadrantes DID, DDD, PDD y PID correspondientes a la zona central del dactilograma.

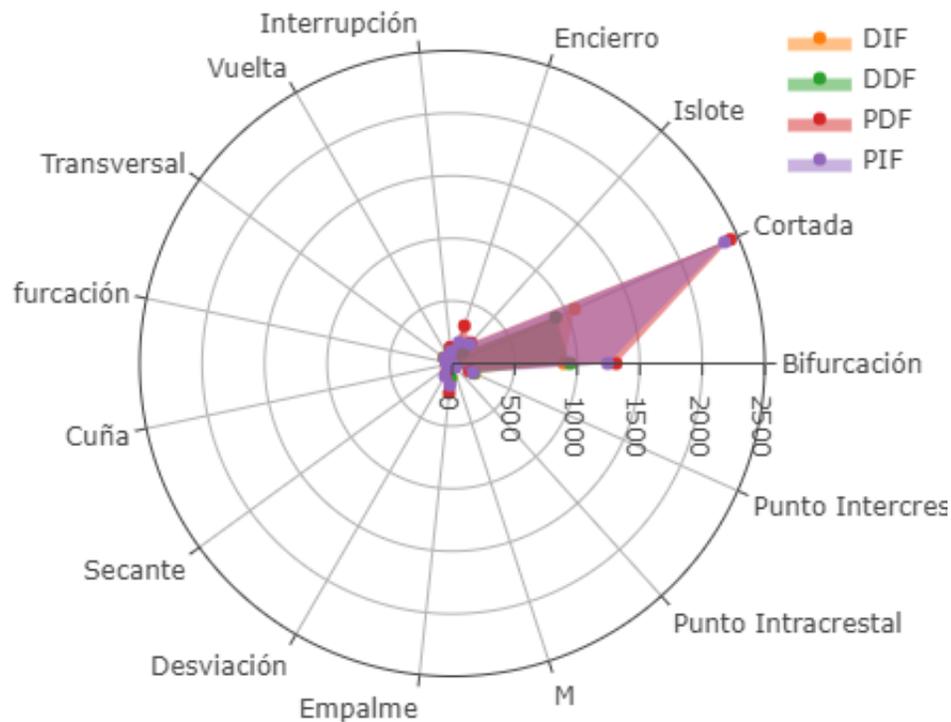


Gráfico 7. Gráfico polar de la frecuencia de cada tipo de minucia en los subcuadrantes DIF, DDF, PDF y PIF correspondientes a la zona de la periferia del dactilograma.

Como se ha venido dilucidando, las minucias con mayor frecuencia de aparición para toda la superficie del dactilograma son las Cortadas y las Bifurcaciones, en la Imagen 26.a pueden observarse los valores de las cantidades totales para estos tipos de minucias, donde la **Bifurcación tiene mayor frecuencia de aparición en el subcuadrante PDD y menor en el DIF**, mientras que la **Cortada, se presenta en mayor cantidad en los subcuadrantes PDF y PIF, y menor en DDF**. La tercera minucia con frecuencia significativa es el **Punto Intercrestal**, la prevalencia del mismo se encuentra en la Imagen 26.b, donde se observa que **los subcuadrantes de mayor expresión son PDD y PID**.

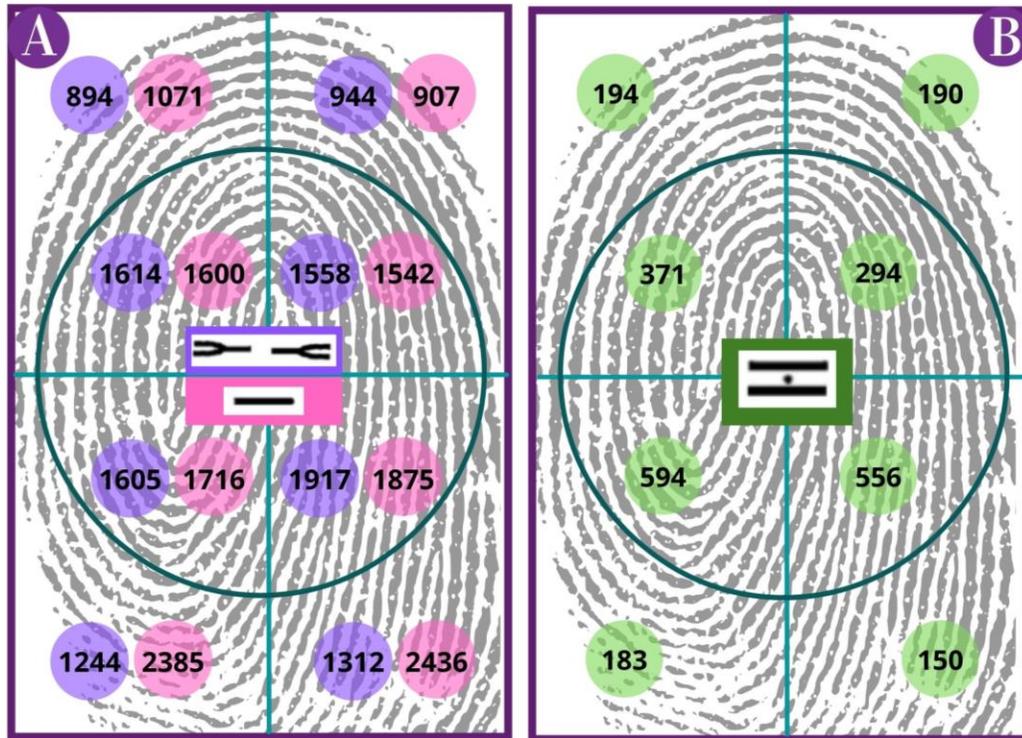


Imagen 26. Dactilogramas con distribución de frecuencias. a) Frecuencias absolutas de las primeras dos minucias con mayor presencia, Bifurcación y Cortada; y b) Frecuencias absolutas de la tercera minucia Punto Intercresta con mayor presencia.

Una vez desarrollados los resultados de la frecuencia y la variabilidad de las minucias con mayor grado de aparición, se torna relevante conocer el comportamiento de aquellas con valores menores de frecuencia, ya que éstas representan en un contexto de identificación una carga individualizante, como se puede observar en la Tabla 1 del Anexo, éstas corresponden a Encierro, Empalme, Islote, Interrupción, Desviación, Transversal, Cuña, Punto Intracrestal, Secante, M, Vuelta y Trifurcación, respectivamente.

En el Gráfico 8 se presenta la variabilidad de tipos de minucias para los subcuadrantes (DID, DDD, PDD y PID) correspondientes a la **zona central** del dactilograma, donde el **Encierro**, el **Islote** y el **Empalme** tienen una prevalencia significativa respecto a los demás tipos de minucias, seguido de la Interrupción, la Transversal y la Desviación. En lo que refiere a la Gráfica 9 se muestran los subcuadrantes (DIF, DDF, PDF y PIF) pertenecientes a la **zona de la periferia**, donde se sigue el mismo patrón que la zona central, siendo la **única diferencia** la **frecuencia mayor de Desviaciones**. Es importante mencionar que en los Gráficos 8 y 9 los ejes correspondientes a las Bifurcaciones y Cortadas no muestran frecuencia debido a

que, con la finalidad de observar la distribución de las minucias con menor prevalencia, los valores de sus casillas fueron anulados (sustituidos por ceros); lo anterior se realizó temporalmente con fines de éste análisis.

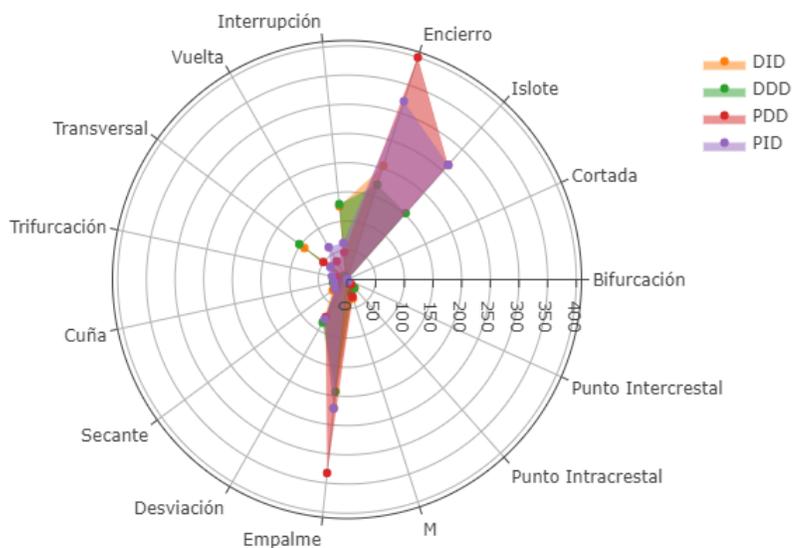


Gráfico 8. Gráfico polar de la frecuencia de las minucias con menor prevalencia en los subcuadrantes DID, DDD, PDD y PID correspondientes a la zona central del dactilograma.

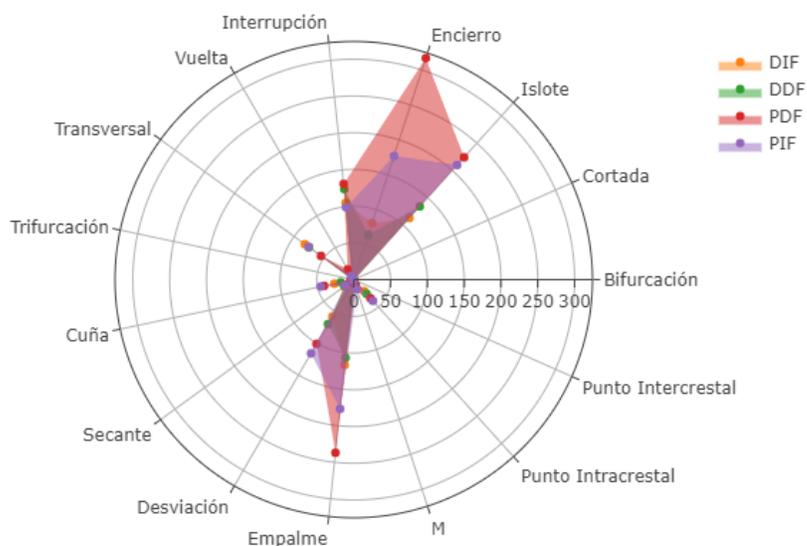


Gráfico 9. Gráfico polar de la frecuencia de las minucias con menor prevalencia en los subcuadrantes DIF, DDF, PDF y PIF correspondientes a la zona de la periferia del dactilograma.

A partir de la observación específica de cada subcuadrante, se obtuvo la caracterización para las minucias menos frecuentes en la **zona central** del dactilograma, mismas que son

ilustradas en los Gráficos 10, 11, 12 y 13, siendo así que, los **Empalmes** se encuentran en mayor concentración en los **subcuadrantes PDD y PID**, los **Encierros e Islotes** en **PDD y PID**, las **Interrupciones** en **DID y DDD** mostrando una diferencia de decenas por encima de los subcuadrantes proximales (PID y PDD), las desviaciones mostraron un comportamiento homogéneo y las **Transversales se concentraron en DDD y DID**. Éstas minucias son las que tuvieron puntajes (totales) para la zona central superiores a 100 registros, las minucias por debajo de éste punto de corte, son Puntos Intracrestales, Secantes, M, Vueltas y Trifurcaciones, sin embargo, su baja prevalencia también es relevante para la caracterización de la muestra, siendo las Vueltas (entre éstas últimas minucias) las de mayor expresión en los subcuadrantes **PDD y PID**, mientras que las M en **DID y PDD**. De éstos resultados puede decirse que **el comportamiento de las minucias en la zona central es homogéneo**, es decir, no mostraron una tendencia especial hacia algún subcuadrante.



Gráfico 10. Frecuencias de los tipos de minucias menos frecuentes en el subcuadrante DID.

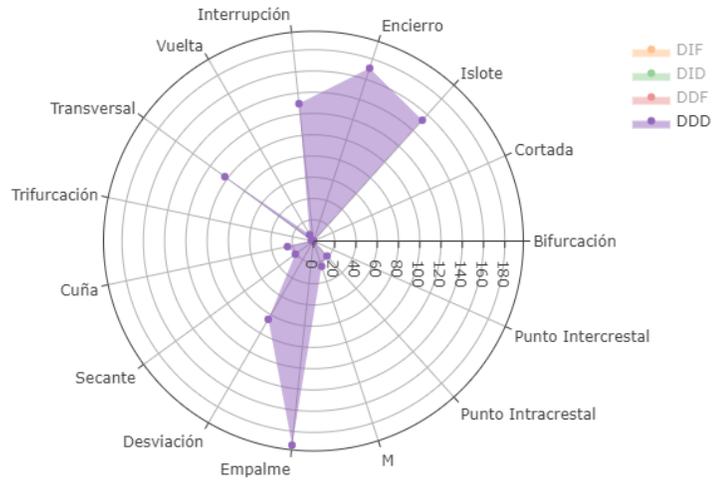


Gráfico 11. Frecuencias de los tipos de minucias menos frecuentes en el subcuadrante DDD.

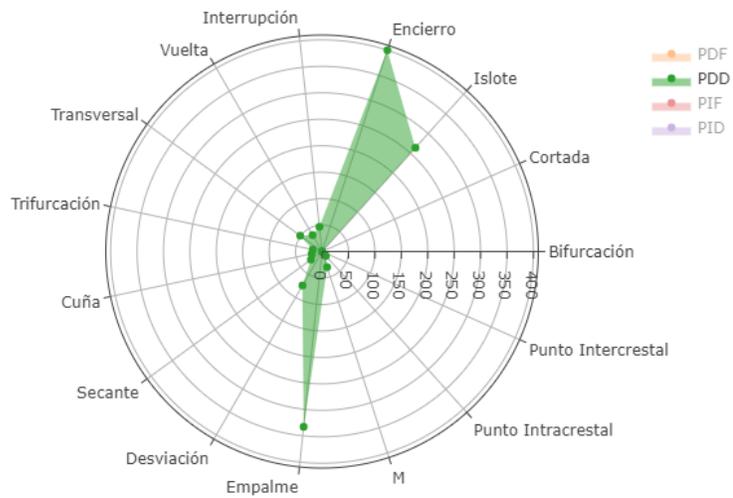


Gráfico 12. Frecuencias de los tipos de minucias menos frecuentes en el subcuadrante PDD.

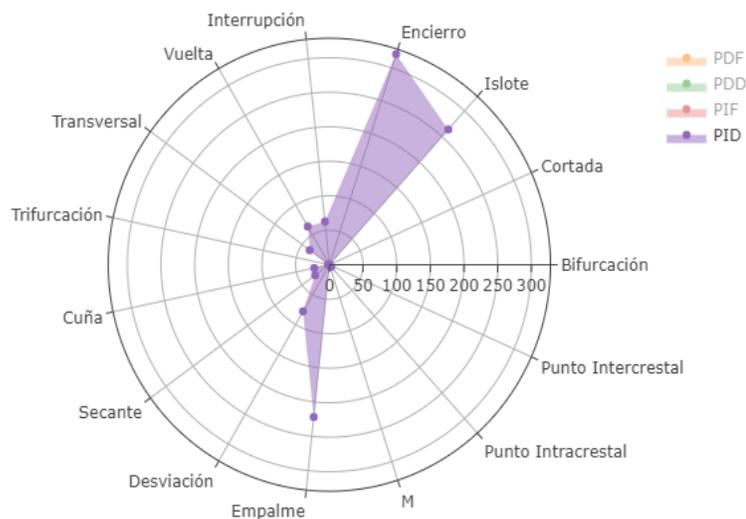


Gráfico 13. Frecuencias de los tipos de minucias menos frecuentes en el subcuadrante PID.

Lo que respecta a la **zona de la periferia**, su variabilidad se ve representada en los Gráficos 14, 15, 16 y 17, siendo así que, los Empalmes se encuentran en mayor concentración en el subcuadrante PDF; los Encierros en PDF; Islotes en PDF y PIF; las Interrupciones en PDF y DDF; las Desviaciones en PDF y PIF; las Transversales en DIF; las Cuñas en PIF y PDF; los Puntos Intracrestales en PIF; y los Intercrestales en DDF. Éstas minucias son las que tuvieron puntajes (totales) para la zona de la periferia superiores a 100 registros, las minucias por debajo de éste punto de corte, son Vueltas, Secantes y M, sin embargo, su comportamiento fue homogéneo para todos los subcuadrantes. De éstos resultados puede decirse que el **subcuadrante con mayor variabilidad de minucias en la zona de la periferia es PDF.**



Gráfico 14. Frecuencias de los tipos de minucias menos frecuentes en el subcuadrante DIF.

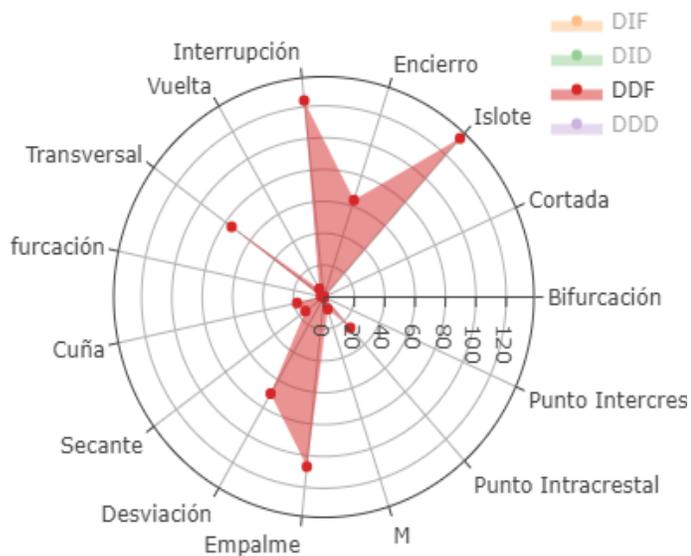


Gráfico 15. Frecuencias de los tipos de minucias menos frecuentes en el subcuadrante DDF.

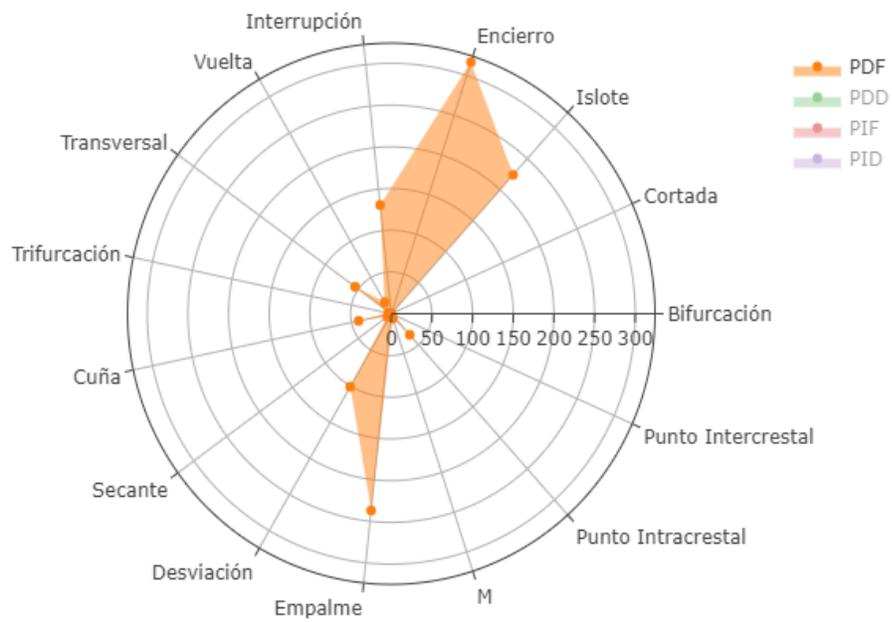


Gráfico 16. Frecuencias de los tipos de minucias menos frecuentes en el subcuadrante PDF.

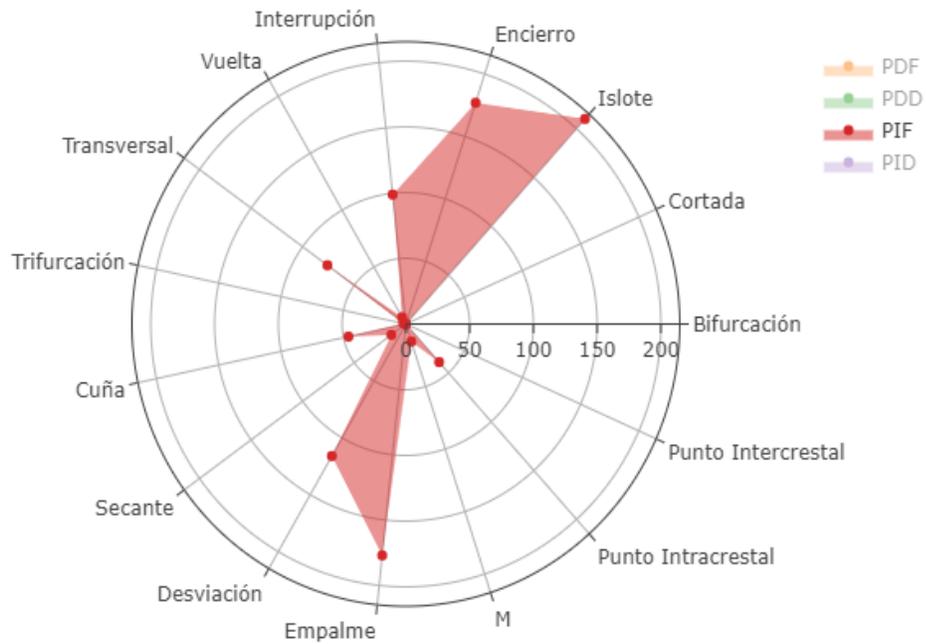


Gráfico 17. Frecuencias de los tipos de minucias menos frecuentes en el subcuadrante PIF.

Las frecuencias descritas en los párrafos anteriores tanto para la zona central como para la periferia respecto a las minucias de menor prevalencia en los Gráficos polares 10-17 se ilustran en la Imagen 27, donde se observan las asociaciones de los tipos de minucias considerando conjuntamente tanto la frecuencia como la interacción en todos los subcuadrantes, obteniendo así que la **carga de variabilidad se encuentra en el subcuadrante PDF al presentar 6 diferentes tipos de minucias de los 15 contemplados, seguidos del subcuadrante PDD con 5 diferentes tipos.**

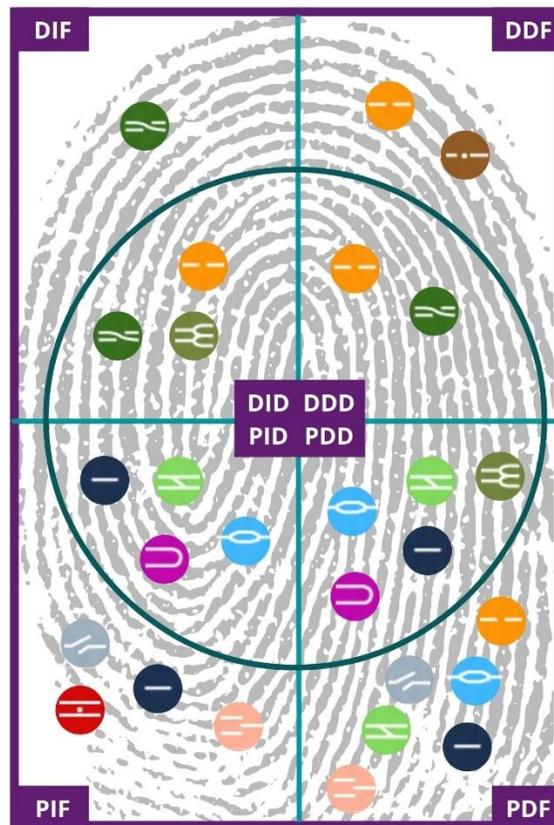


Imagen 27. Dactilograma de las asociaciones de las minucias menos frecuentes obtenidas.

Variabilidad por tipo fundamental

Para explorar la variabilidad de los 15 tipos de minucias en función del tipo fundamental (Arco, Presilla externa, Presilla interna y Verticilo) se procedió a hacer uso de la estadística bivariante a partir de *heatmaps*, donde por cada tipo fundamental se consideró al sexo (Hombres y Mujeres) como un factor para observar los patrones de agrupamiento.

Arco

En el Gráfico 18 se observa la matriz general correspondiente al tipo fundamental Arco, donde el clúster del eje x de la variable “tipo de minucias” muestra el patrón de asociación entre cada una, obteniendo así **cinco grupos**, el **primero** corresponde a las **Cortadas y Bifurcaciones**, el **segundo** a **Puntos Intercretales**, el **tercero** a **Encierros y Empalmes**, el **cuarto** a **Islotes** y el **quinto** a **Transversal y Desviación**. En lo que refiere a los grupos con ramificaciones más cercanas al plano, se tiene que los tipos de **minucias** con **menor prevalencia** para este tipo fundamental son **la Trifurcación, la Vuelta y la Secante**. En relación al eje Y correspondiente a los individuos, se observan dos grupos, la diferencia que destaca entre ellos es la ausencia de cortadas para el primer grupo (de abajo hacia arriba) respecto al segundo.

En los Gráficos 19 y 20 se observan los *heatmaps* correspondientes a la división por sexo para éste tipo fundamental. Para los **hombres** (ver Gráfico 19) en el clúster ubicado en el extremo superior de la matriz se observa la formación de **cinco grupos**, el **primero** corresponde a **la Cortada y la Bifurcación**, el **segundo** al **Punto Intercrestal**, el **tercero** al **Encierro**, el **cuarto** al **Islote** y el **Empalme**, y el **quinto** a **Transversal y Desviación**. En relación al eje Y correspondiente a los individuos, se observan dos grupos, la diferencia que destaca entre ellos es la ausencia de cortadas para el primer grupo (de abajo hacia arriba) respecto al segundo.

En el caso de las **mujeres** (ver Gráfico 20), en el clúster correspondiente a la variable de tipos de minucias se observa la formación de **cuatro grupos**, el **primero** corresponde a la **Bifurcación y Cortada**, el **segundo** a **Punto Intercrestal**, el **tercero** a **Empalme y Encierro** y el **cuarto** a **Islote**. En relación al eje de los individuos también se observa la

formación de dos grupos, la diferencia que destaca entre ellos es la presencia de mayor registro de cortadas para el primer grupo (de arriba a abajo) respecto al segundo.

En ambos sexos se observa una similitud en el comportamiento de bifurcaciones, siendo las **cortadas** las que presentaron **mayor presencia** -para este tipo fundamental- **en las mujeres**. Respecto a la variabilidad de minucias, a pesar de tener un comportamiento general (ver Gráfico 18) se pueden apreciar diferencias entre sexos al observarlos por separado, siendo así que los **Empalmes y Encierros tienen mayor asociación con las mujeres**.

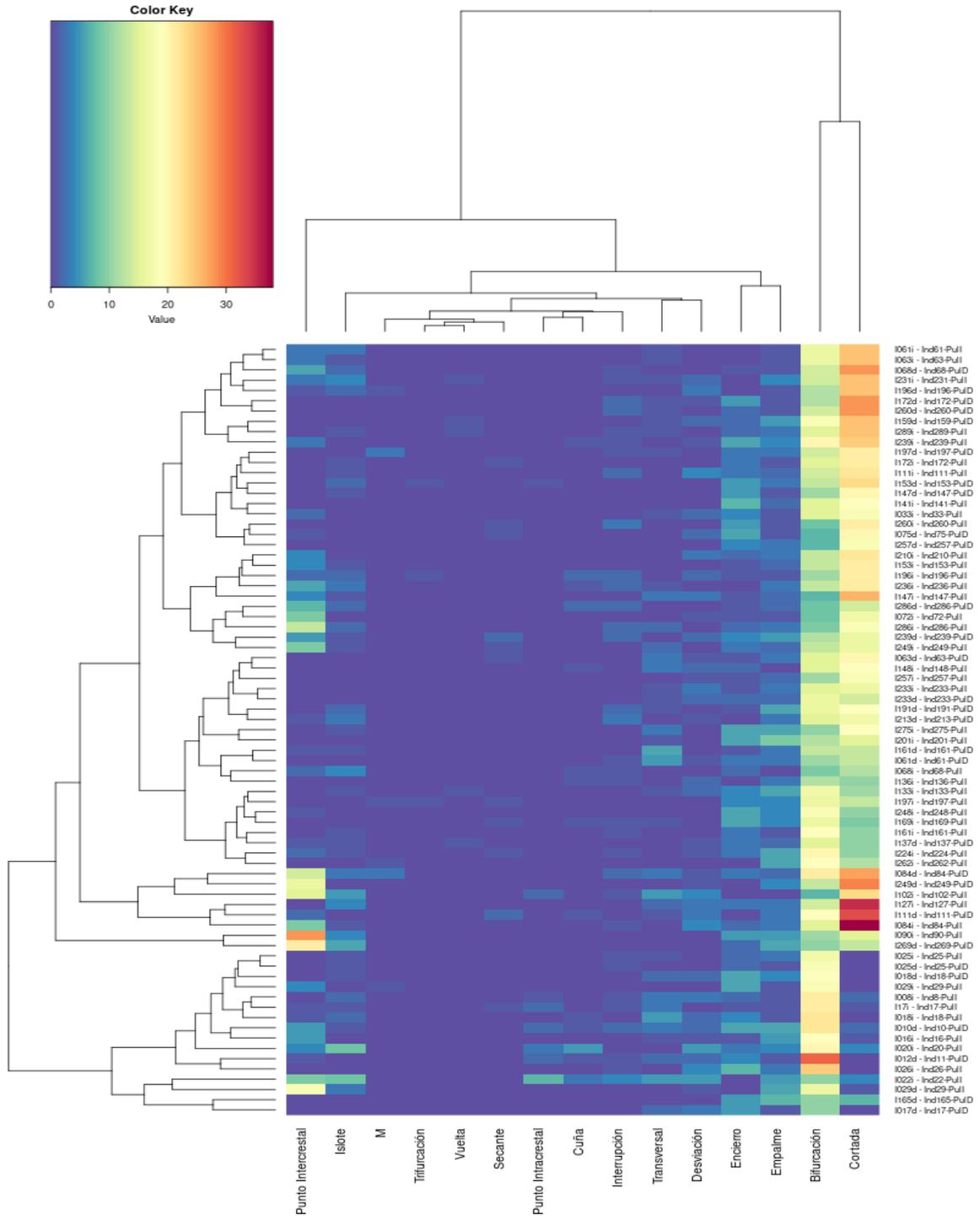


Gráfico 18. *Heatmap* correspondiente al tipo fundamental Arco.

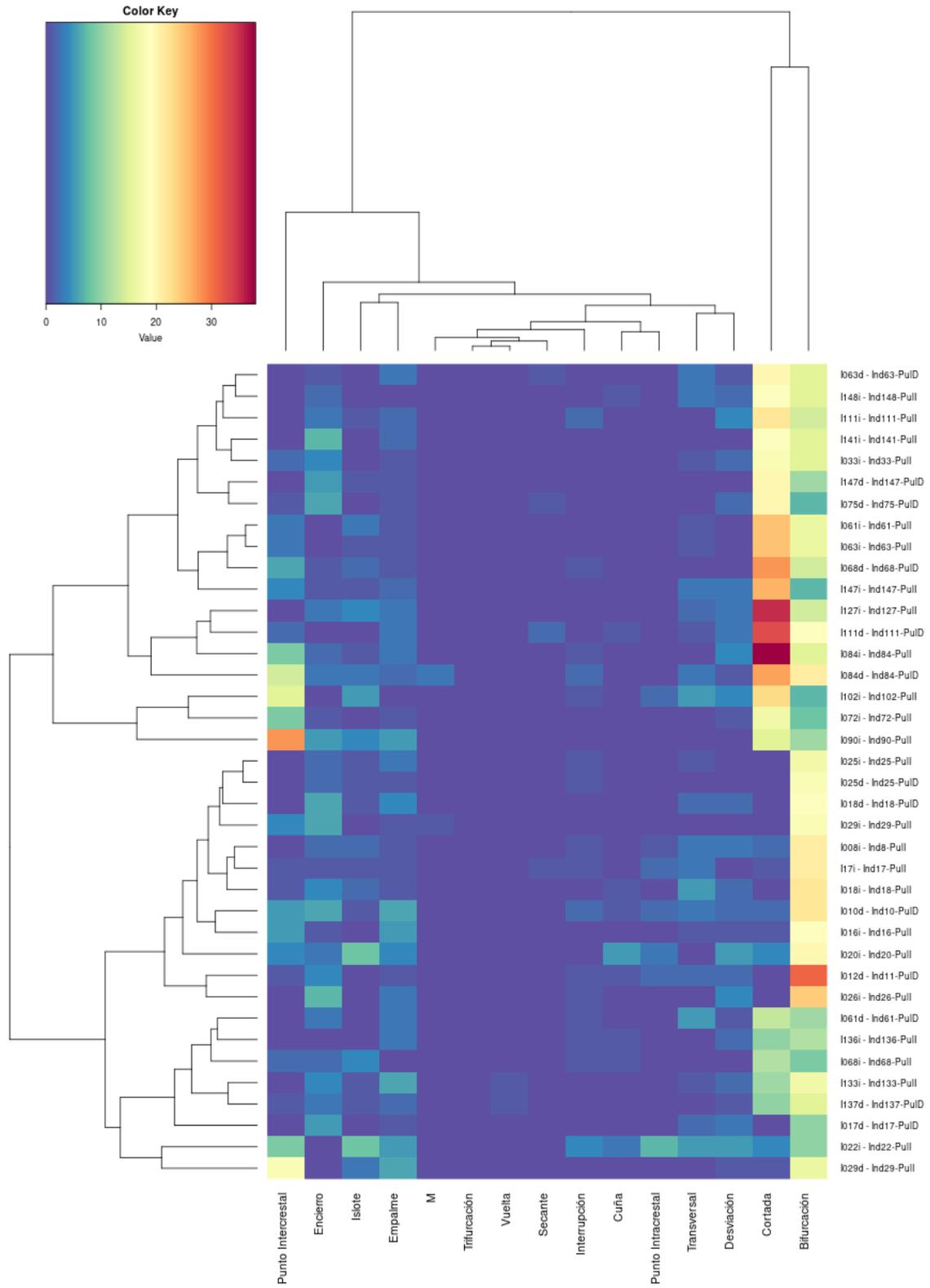


Gráfico 19. *Heatmap* correspondiente al tipo fundamental Arco - Sexo masculino

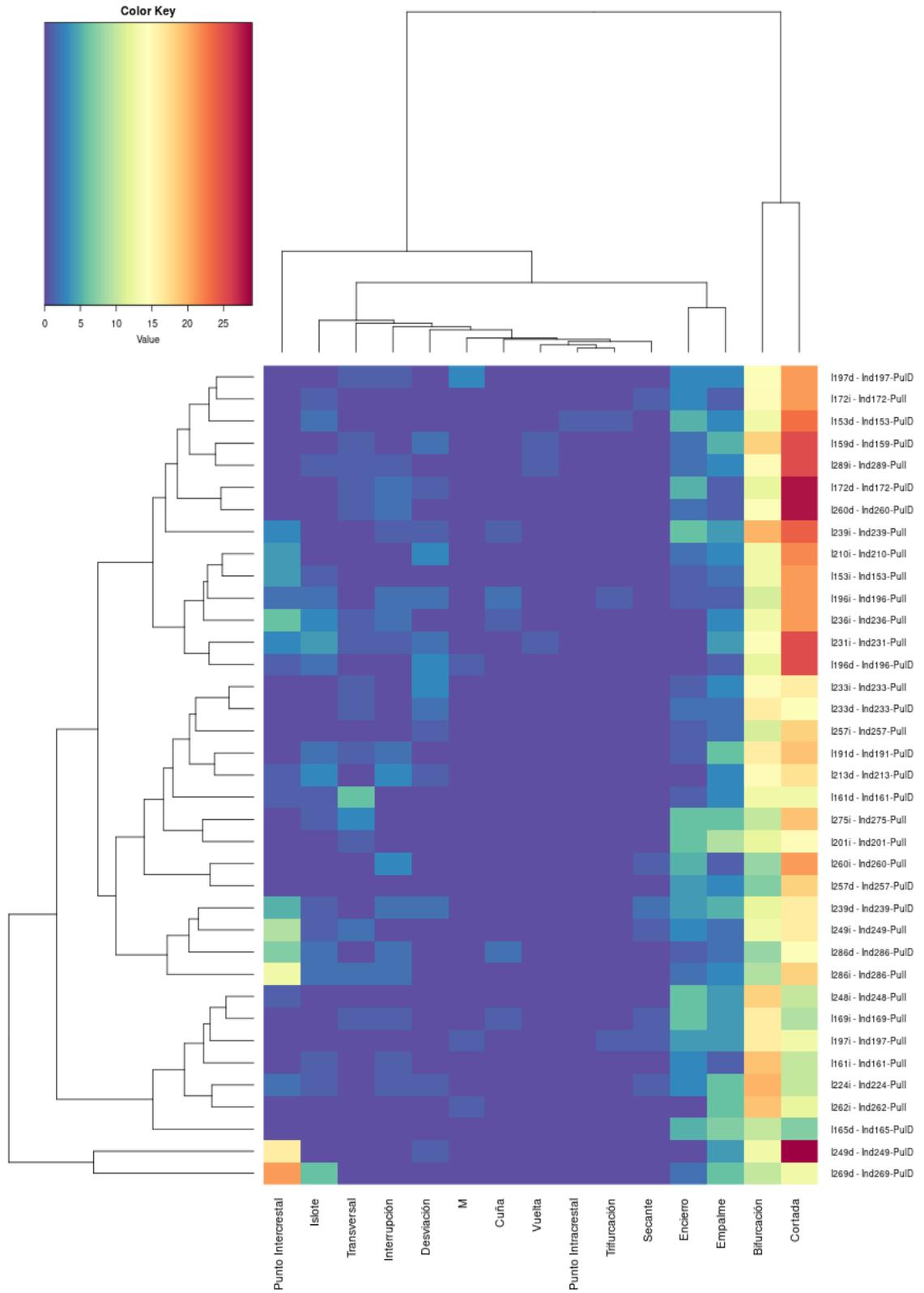


Gráfico 20. *Heatmap* correspondiente al tipo fundamental Arco - Sexo femenino

Presilla interna

En el Gráfico 21 se observa la matriz general correspondiente al tipo fundamental Presilla interna, donde el clúster del “tipo de minucias” muestra el patrón de asociación **cinco grupos**, el **primero** corresponde a las **Cortadas y Bifurcaciones**, el **segundo** a **Puntos Intercrestales**, el **tercero** a **Islotes**, el **cuarto** a **Empalmes y Encierros**, y el **quinto** a **Interrupciones**. En lo que refiere a los grupos con ramificaciones más cercanas al plano, se tiene que los tipos de **minucias** con **menor prevalencia** para este tipo fundamental son la **Trifurcación**, el **Punto Intracrestal** y la **Secante**. En relación al eje correspondiente a los individuos, se observan tres grupos, la diferencia que destaca entre ellos es la ausencia de cortadas para el primer grupo (patrón azul de abajo hacia arriba), y la cantidad de cortadas para el segundo grupo respecto al último (patrón de tonalidades naranjas).

En los Gráficos 22 y 23 se observan los *heatmaps* correspondientes a la división por sexo para éste tipo fundamental. Para los **hombres** (ver Gráfico 22) en el clúster ubicado en el extremo superior del dactilograma se observa la formación de **seis grupos**, el **primero** corresponde a **la Cortada y la Bifurcación**, el **segundo** al **Punto Intercrestal**, el **tercero** al **Islote**, el **cuarto** al **Empalme y Encierro**, el **quinto** a la **Interrupción** y el **sexto** a **Transversal y Desviación**. En relación al eje Y correspondiente a los individuos, se observan cuatro grupos, la diferencia que destaca entre ellos es la ausencia de cortadas para el primero (de abajo hacia arriba), y el patrón de tonalidades naranjas que indica una mayor prevalencia de éste tipo de minucia para el último grupo.

En el caso de las **mujeres** (ver Gráfico 23), en el clúster correspondiente a la variable de tipos de minucias se observa la formación de **cinco grupos**, el **primero** corresponde a la **Cortada y la Bifurcación**, el **segundo** al **Punto Intercrestal**, el **tercero** al **Islote**, el **cuarto** al **Empalme y Encierro**, y el **quinto** a la **Interrupción**. En relación al eje de los individuos se observa la formación de cuatro grupos, la diferencia que destaca entre ellos es la cantidad de cortadas para cada uno.

En ambos sexos se observa una similitud en el comportamiento de bifurcaciones, siendo las **cortadas las que presentaron mayor presencia en las mujeres**. En relación a la

variabilidad de minucias, se observa que el comportamiento respecto a los clústers superiores es el mismo para ambos sexos, con la excepción de una **prevalencia mayor** para el caso del tipo de minucia **Transversal y Desviación en el caso de los hombres.**

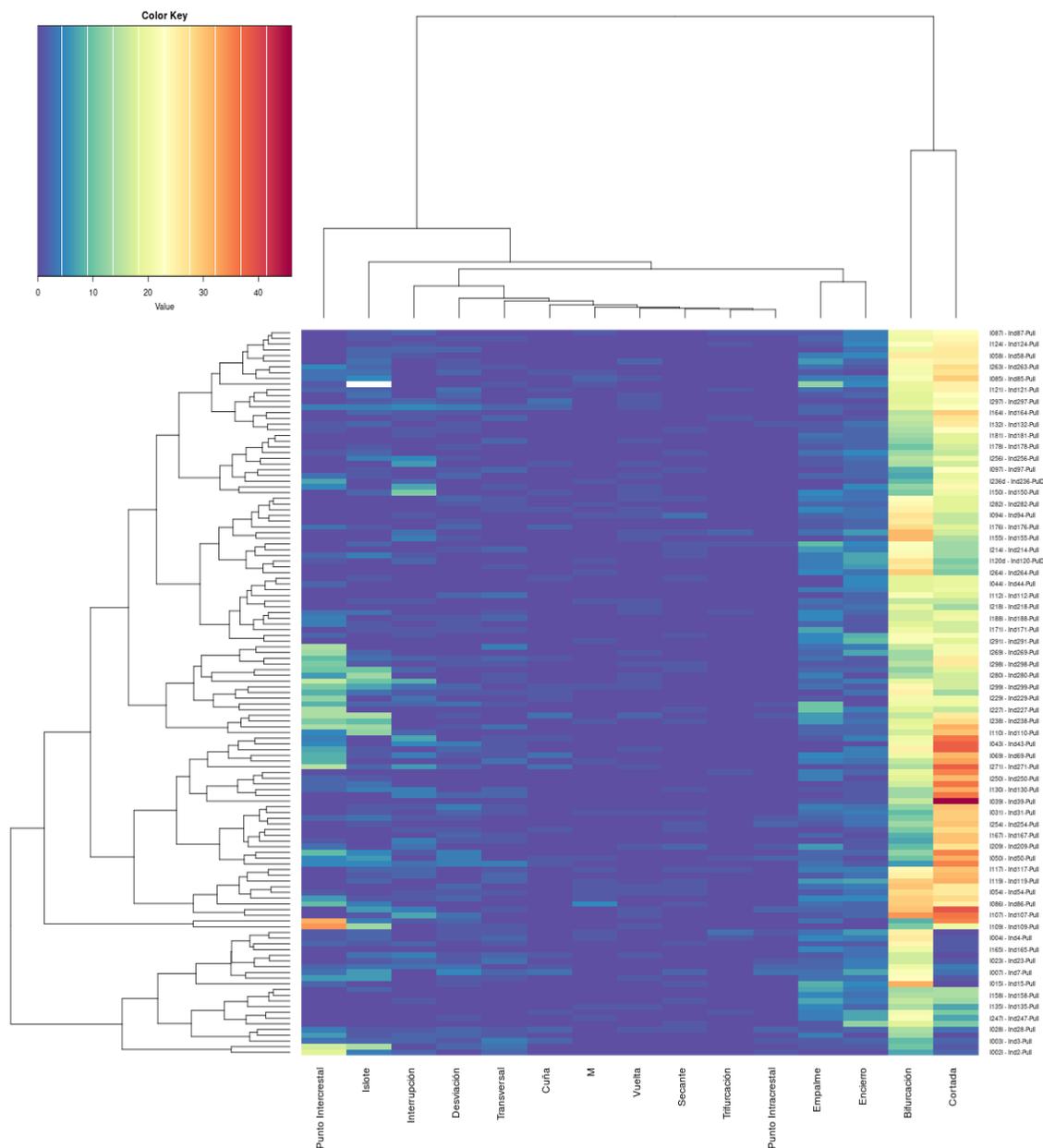


Gráfico 21. *Heatmap* correspondiente al tipo fundamental Presilla Interna

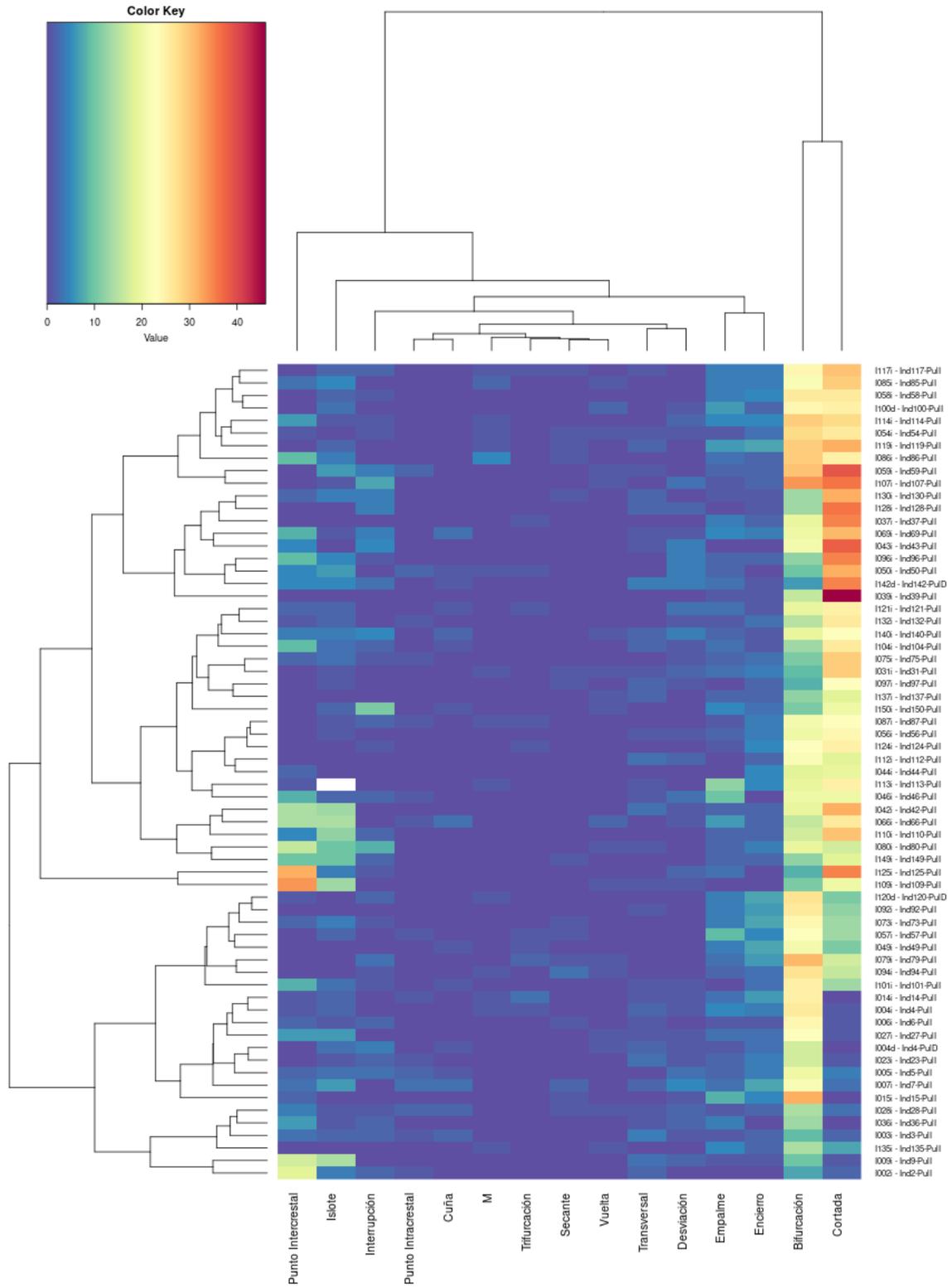


Gráfico 22. Heatmap correspondiente al tipo fundamental Presilla Interna - Sexo masculino.

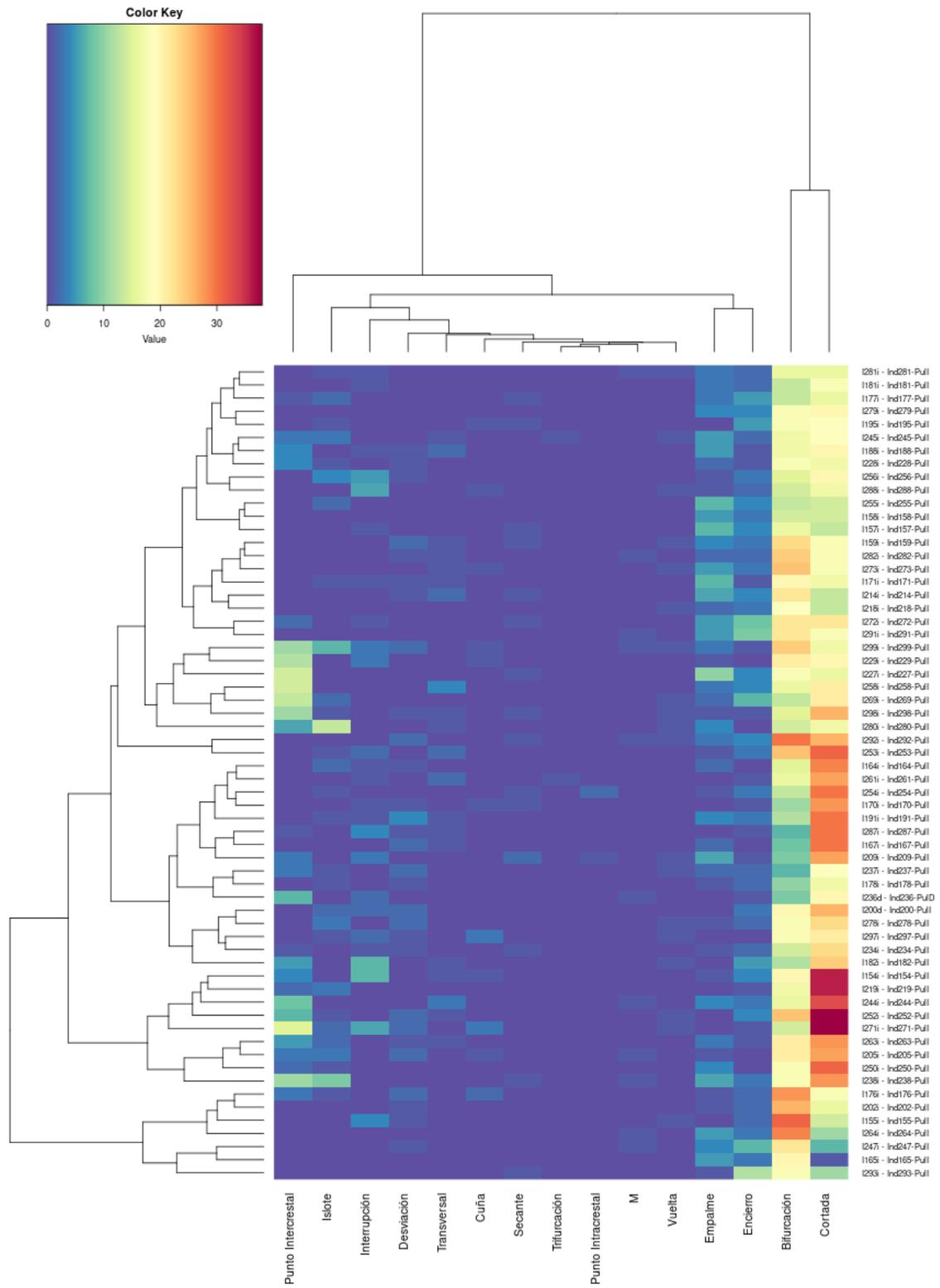


Gráfico 23. *Heatmap* correspondiente al tipo fundamental Presilla interna - Sexo femenino

Presilla externa

En el Gráfico 24 se observa la matriz general correspondiente al tipo fundamental Presilla externa, donde el clúster del “tipo de minucias” muestra el patrón de asociación de **siete grupos**, el **primero** corresponde a **las Cortadas y Bifurcaciones**, el **segundo** a **Puntos Intercrestales**, el **tercero** a **Islotes**, el **cuarto** a **Interrupciones**, y el **quinto** a **Empalmes y Encierros**, el **sexto** a **Transversales** y el **séptimo** a **Desviaciones**. En lo que refiere a los grupos con ramificaciones más cercanas al plano, se tiene que el tipo de minucia con **menor prevalencia** para este tipo fundamental es la **Trifurcación**. En relación al eje correspondiente a los individuos, se observan dos grupos, la diferencia que destaca entre ellos es, nuevamente, la cantidad de cortadas para los individuos.

En los gráficos 25 y 26 se observan los *heatmaps* correspondientes a la división por sexo para éste tipo fundamental. Para los **hombres** (ver Gráfico 25) en el clúster ubicado en el extremo superior del dactilograma se observa la formación de **seis grupos**, el **primero** corresponde a **la Cortada y la Bifurcación**, el **segundo** al **Punto Intercrestral**, el **tercero** al **Islote**, el **cuarto** al **Empalme y Encierro**, el **quinto** a la **Interrupción** y el **sexto** a **Transversal y Desviación**. En relación al eje Y correspondiente a los individuos, se observan tres grupos, la diferencia que destaca entre ellos es la ausencia de cortadas para el primero (de abajo hacia arriba), y el patrón de tonalidades naranjas que indica una mayor prevalencia de éste tipo de minucia para los demás grupos.

En el caso de las **mujeres** (ver Gráfico 26), en el clúster correspondiente a la variable de tipos de minucias se observa la formación de **seis grupos**, los cuales siguen el mismo patrón que los hombres. En relación al eje de los individuos se observa la formación de **cuatro grupos**, la diferencia que destaca entre ellos es la cantidad de cortadas para cada uno.

En ambos sexos se observa una similitud en el comportamiento de bifurcaciones. En relación a la variabilidad de minucias, se observa que el comportamiento respecto a los clústers superiores es el mismo para ambos sexos, y a manera de **comparativa** entre **Presillas**, se **presenta una mayor formación de agrupaciones para la Presilla Externa** (grupo cinco y

siete), lo que refiere una presencia de dos tipos de minucias más que en la presilla interna, sin embargo, el comportamiento de los primeros cinco grupos es exactamente el mismo.

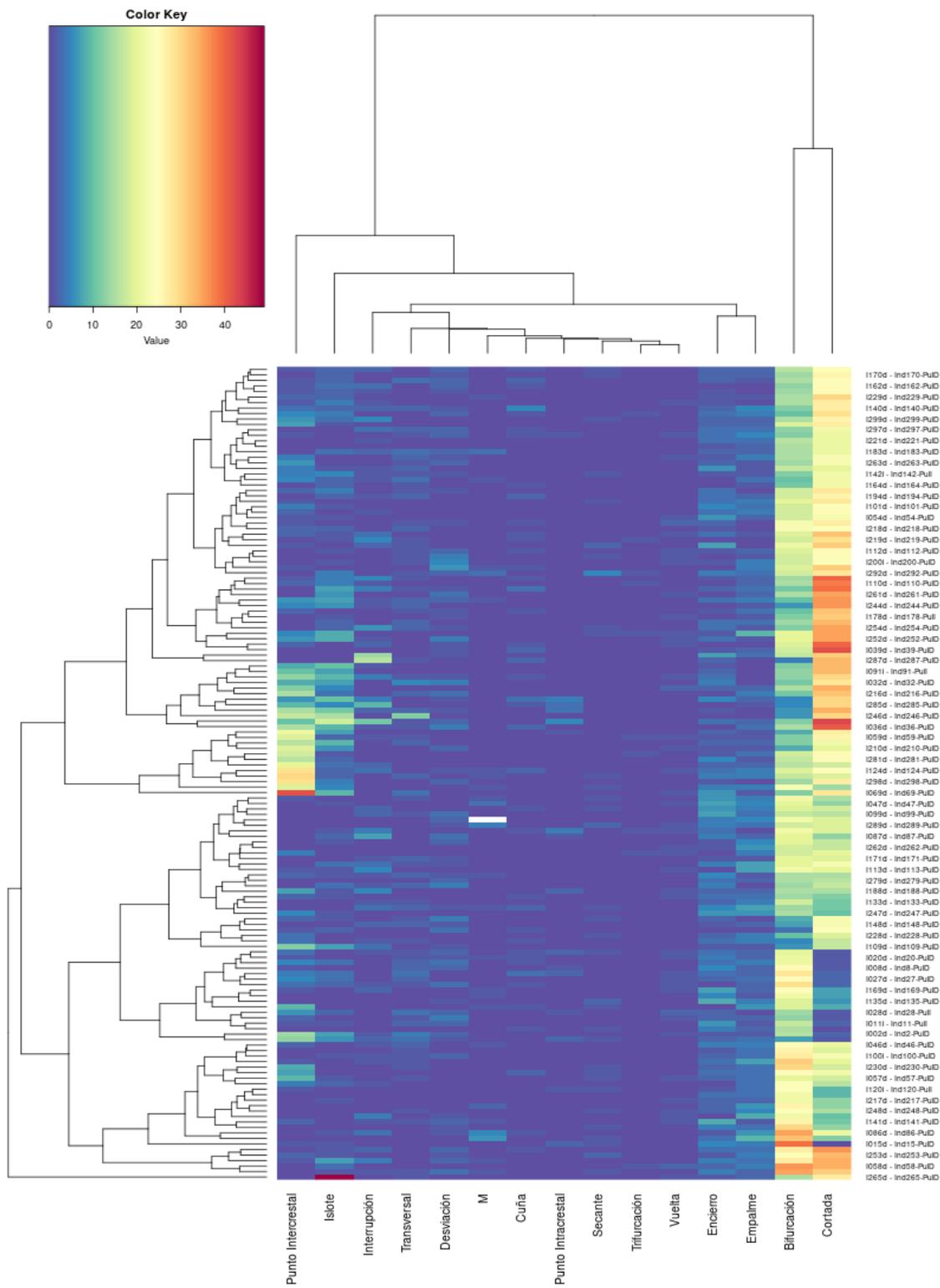


Gráfico 24. Heatmap correspondiente al tipo fundamental Presilla externa

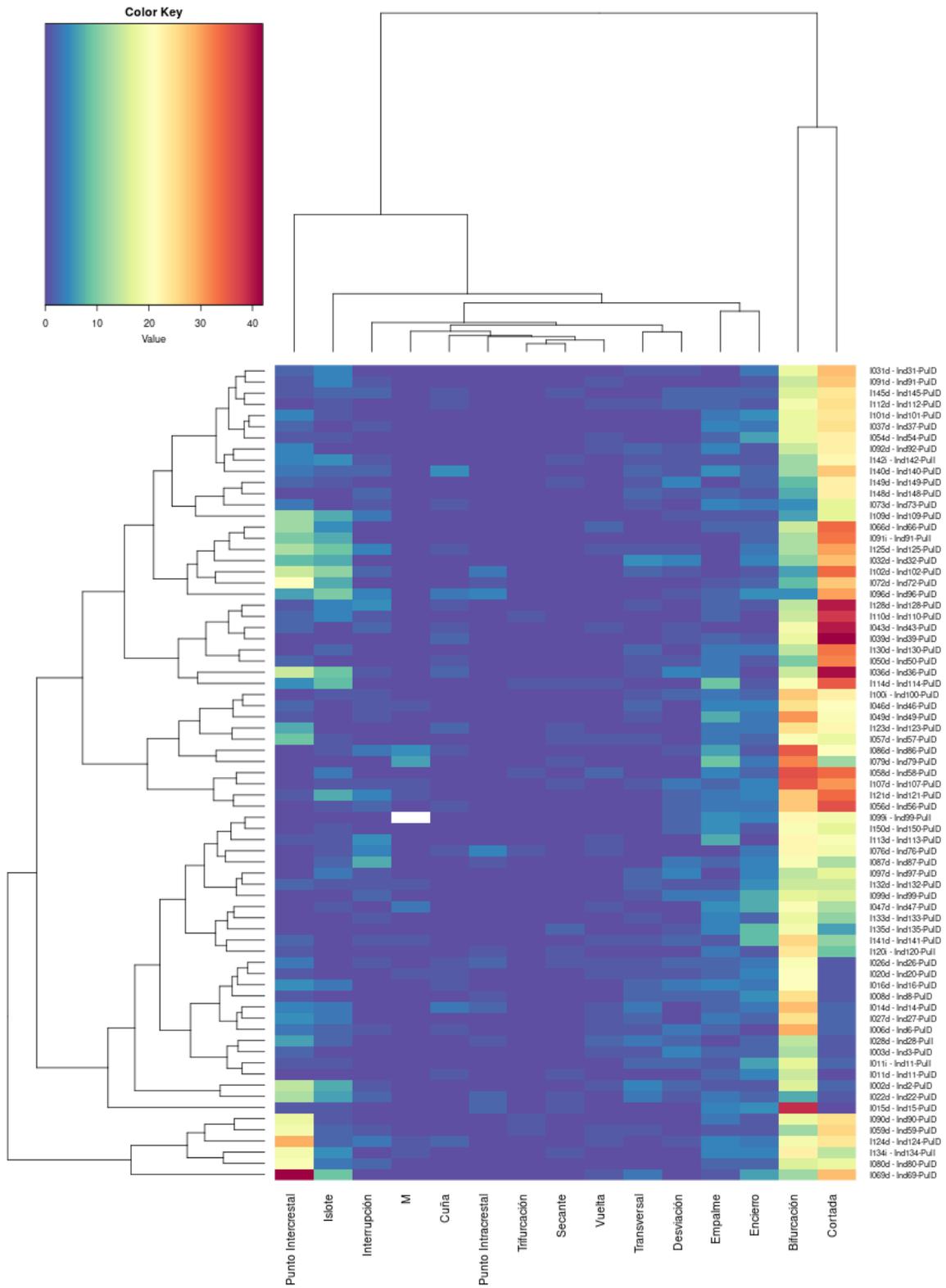


Gráfico 25. *Heatmap* correspondiente al tipo fundamental Presilla externa - Sexo masculino

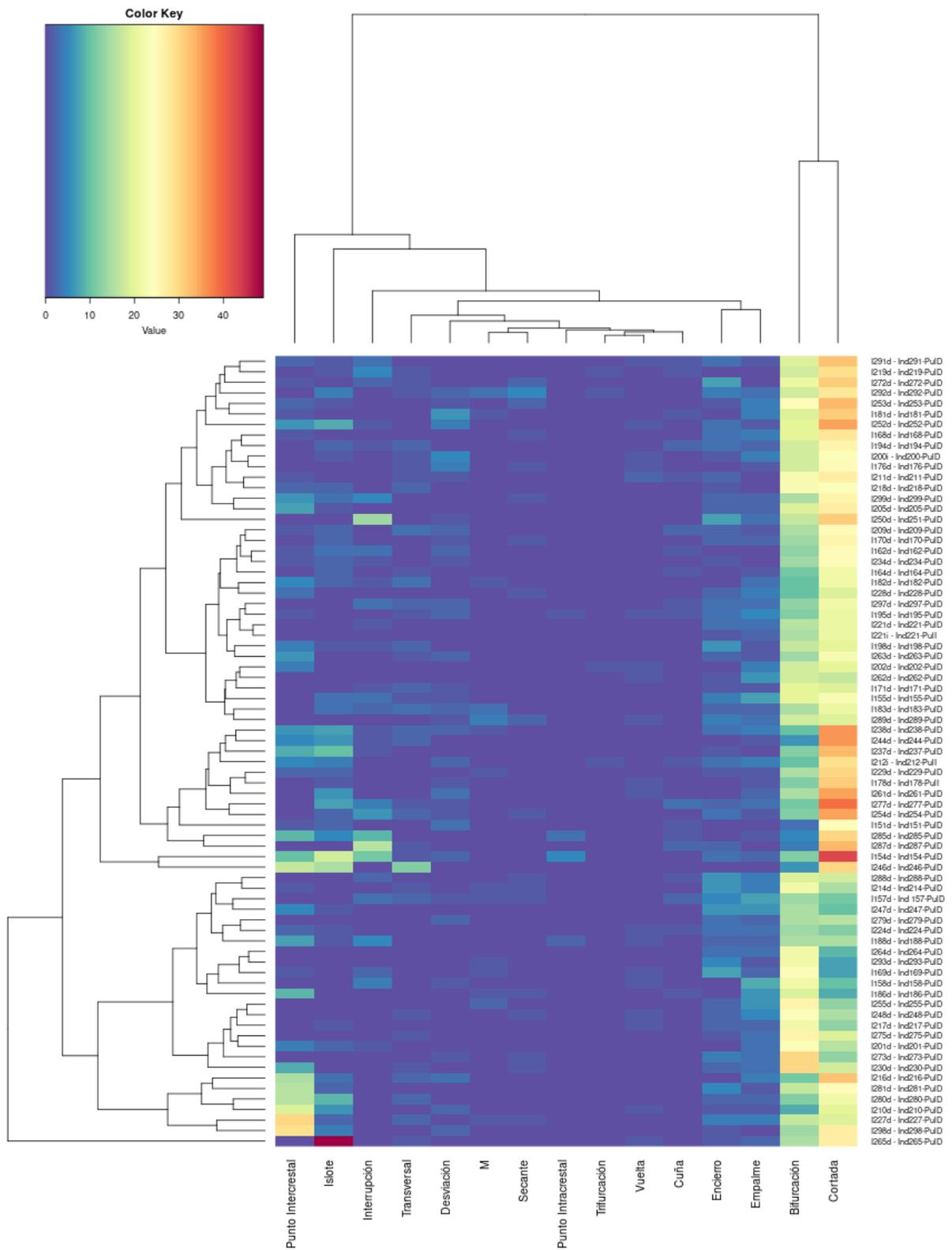


Gráfico 26. *Heatmap* correspondiente al tipo fundamental Presilla externa - Sexo femenino

Verticilo

En el Gráfico 27 se observa la matriz general correspondiente al tipo fundamental Verticilo, donde el clúster del “tipo de minucias” muestra en el patrón de asociación **seis grupos**, el **primero** corresponde a las **Cortadas y Bifurcaciones**, el **segundo** a **Puntos Intercretales**, el **tercero** a **Islotes**, el **cuarto** a **Encierros y Empalmes**, el **quinto** a **Interrupciones** y el **sexto** a **Transversales y Desviaciones**. En lo que refiere a los grupos con ramificaciones más cercanas al plano, se tiene que los tipos de minucias con **menor** prevalencia para este tipo fundamental son la **Trifurcación**, **la Vuelta** y **la Secante**. En relación al eje correspondiente a los individuos, se observan dos grupos, la diferencia que destaca entre ellos es, nuevamente, la cantidad de cortadas para los individuos.

En los gráficos 28 y 29 se observan los *heatmaps* correspondientes a la división por sexo para éste tipo fundamental. Para los **hombres** (ver Gráfico 28) en el clúster ubicado en el extremo superior del dactilograma se observa la formación de **siete grupos**, el **primero** corresponde a **la Cortada y la Bifurcación**, el **segundo** al **Punto Intercrestal**, el **tercero** al **Islote**, el **cuarto** al **Empalme y Encierro**, el **quinto** a **la Interrupción**, el **sexto** a **Transversal y Desviación**, y el **séptimo** a **Punto Intracrestal**. En relación al eje Y correspondiente a los individuos, se observan tres grupos, la diferencia que destaca entre ellos es una cantidad superior de cortadas para el primero (de abajo hacia arriba), una disminución para el segundo y un incremento para el último.

En el caso de las **mujeres** (ver Gráfico 29), en el clúster correspondiente a la variable de tipos de minucias se observa la formación de **siete grupos**, el **primero** corresponde a **la Cortada y la Bifurcación**, el **segundo** al **Punto Intercrestal**, el **tercero** al **Encierro y Empalme**, el **cuarto** al **Islote**, el **quinto** a **la Interrupción**, el **sexto** a **Desviación**, y el **séptimo** a **Transversal**. En relación al eje de los individuos se observa la formación de dos grupos, la diferencia que destaca entre ellos es la cantidad de cortadas para cada uno, siendo el primero (de arriba hacia abajo) el que presenta considerablemente mayor cantidad de ellas.

En ambos sexos se observa una similitud en el comportamiento de Bifurcaciones. En relación a la variabilidad de minucias, se observa que el comportamiento respecto a los clústeres

superiores difiere muy poco para ambos sexos, siendo la **única diferencia el séptimo grupo correspondiente al Punto Intracrestal** que muestra mayor asociación para el sexo masculino.

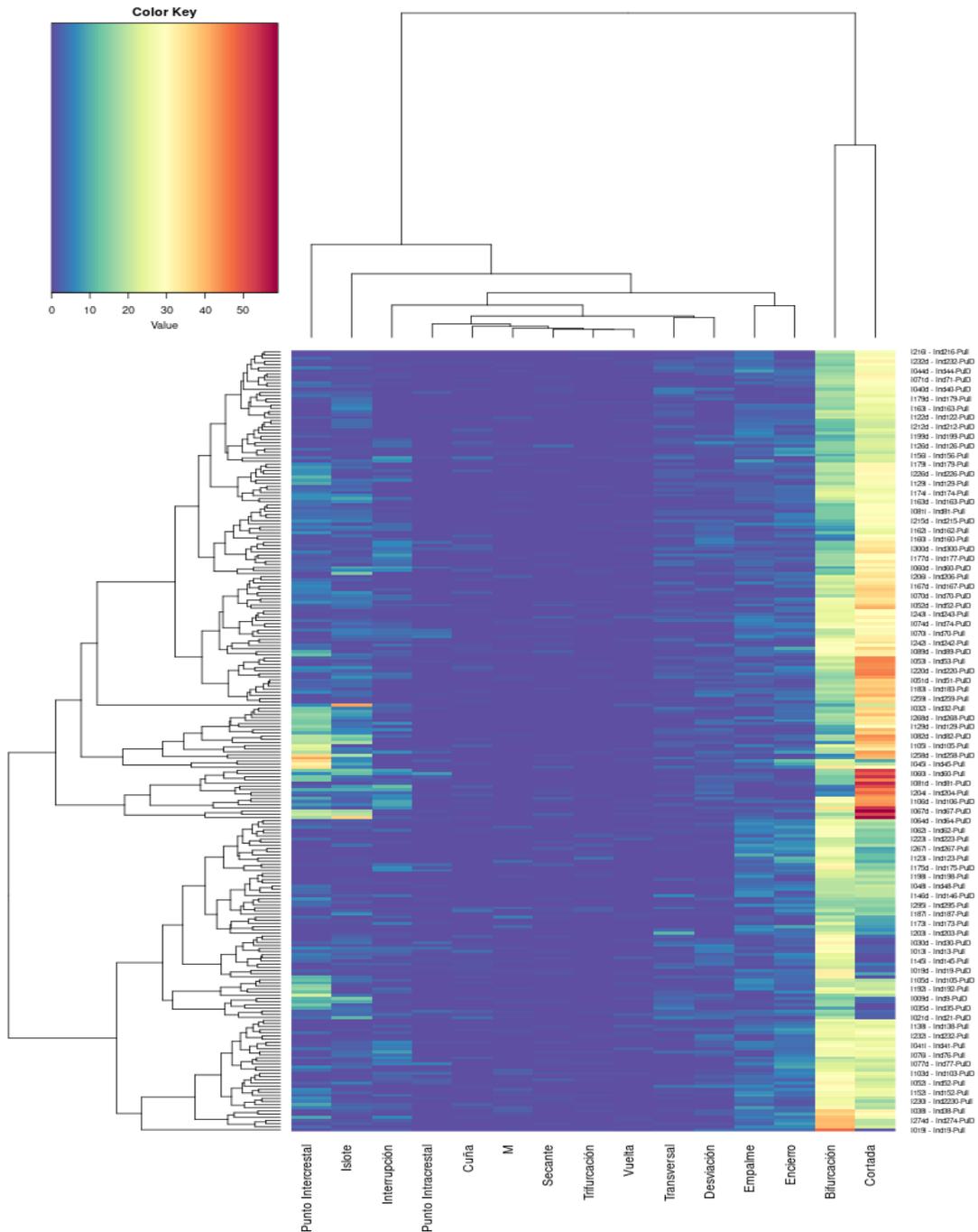


Gráfico 27. *Heatmap* correspondiente al tipo fundamental Verticilo

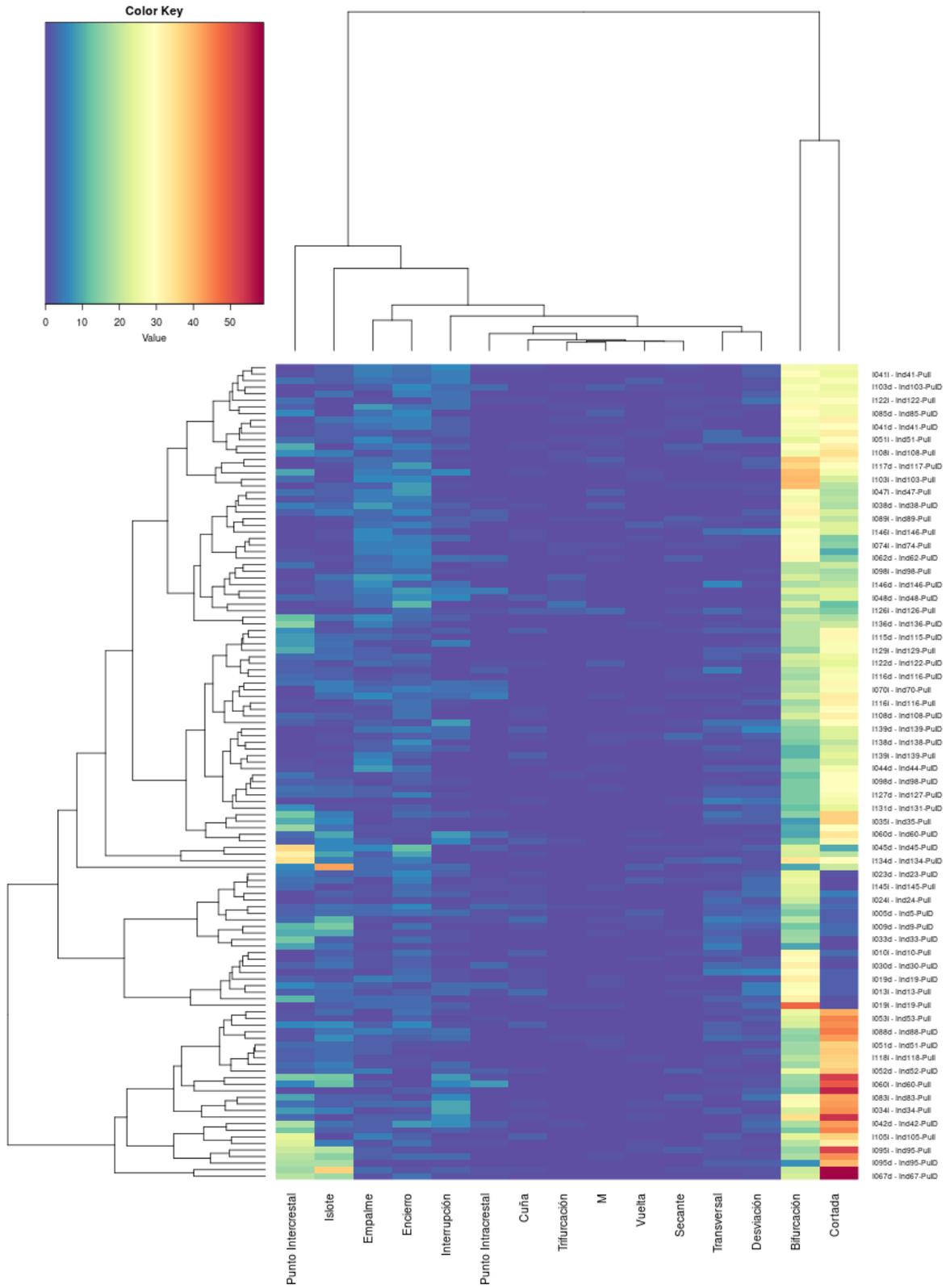


Gráfico 28. *Heatmap* correspondiente al tipo fundamental Verticilo - Sexo masculino

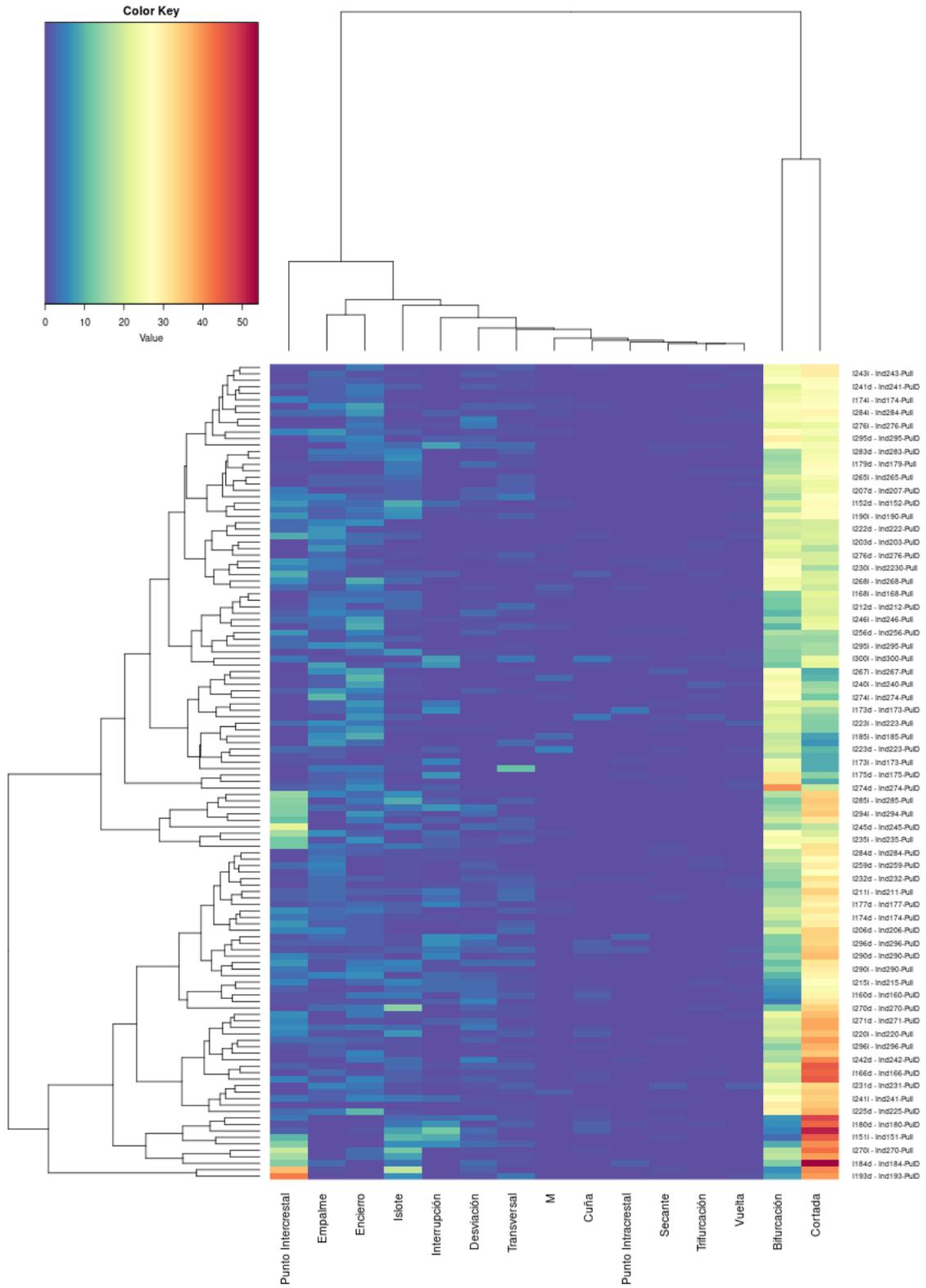


Gráfico 29. Heatmap correspondiente al tipo fundamental Verticilo - Sexo femenino

A partir de la información presentada se obtiene que las minucias Transversal y Desviación tienen mayor asociación con el Arco y la Presilla Interna para el sexo masculino, mientras que para el sexo femenino la minucia con mayor asociación en Arcos es el Empalme. Respecto al Verticilo, los Puntos Intracrestales mostraron una mayor asociación para el sexo masculino; lo que concierne a las Presillas, se encontró que la Cortada presenta mayor asociación con la Presilla interna para el sexo masculino, y con la externa para el sexo femenino. Con la finalidad de observar de manera conjunta la variabilidad de los tipos de minucias para los cuatro tipos fundamentales, se realizó un esquema tomando en cuenta las agrupaciones generales mencionadas para cada uno.

En la Imagen 28 se aprecia que los tipos fundamentales que presentan más variabilidad de tipos de minucias son el Verticilo y la Presilla externa, mismos que cuentan con 9 de los 15 establecidos, aunado a esto, se coloca la frecuencia absoluta y relativa del total de minucias cuantificadas en cada tipo fundamental, encontrando que el Verticilo contiene el 46.8%, siendo el patrón con mayor variabilidad, seguido de la Presilla externa (23.6%), Presilla interna (19.9%) y Arco (9.5%), respectivamente.

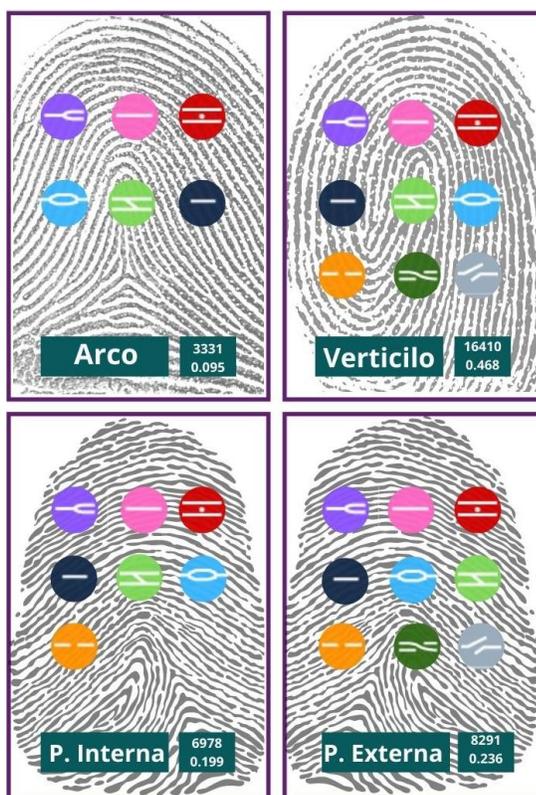


Imagen 28. Presencia de los tipos de minucias más frecuentes por tipo fundamental.

Con la finalidad de conocer si había diferencias significativas entre los tipos de minucias respecto a cada tipo fundamental se procedió a realizar la prueba Kruskal Wallis, donde se plantearon las siguientes hipótesis:

Hipótesis Nula	La prueba Kruskal plantea que las medianas de los tipos de minucias son iguales para cada tipo fundamental
Hipótesis alternativa	Al menos una de las medianas de los tipos de minucias es diferente para cada tipo fundamental

Los *p-values* obtenidos del estadístico se muestran en la Tabla 5, a partir de los cuáles se puede concluir con un nivel de confianza del 95% que se rechaza la hipótesis nula ($p\text{-values} < 0.05$) para cada tipo fundamental, obteniendo que sí existe al menos un tipo de minucia diferente de forma significativa.

<i>Tipo fundamental</i>	<i>P-value</i>
<i>Presilla externa</i>	$< 2.2e-16$
<i>Presilla interna</i>	$< 2.2e-16$
<i>Verticilo</i>	$< 2.2e-16$
<i>Arco</i>	$< 2.2e-16$

Tabla 5. Valores de *p-value* obtenidos de la prueba Kruskal Wallis para cada tipo fundamental.

Con la finalidad de conocer qué tipo de minucias presentan dichas diferencias en cada tipo fundamental, se empleó una prueba *POST HOC*, la cual realiza una comparación por pares de todas las combinaciones posibles respecto a las variables que se tienen, en éste caso son los tipos de minucias, por ejemplo, Bifurcación (Bif) vs Cortada (Cor), Bifurcación (Bif) vs Desviación (Desv) por mencionar algunas.

Los *p-values* obtenidos del estadístico para cada tipo fundamental se muestran en la Tabla 6 para Presilla externa, Tabla 7 para Presilla interna, Tabla 8 para Verticilo y Tabla 9 para Arco. A partir de los datos obtenidos se puede concluir con un nivel de confianza del 95%

que se rechaza la hipótesis nula de “no diferencias” (p -values < 0.05) en las frecuencias de las minucias, obteniendo así los siguientes resultados:

- a) Las minucias Bifurcación (Bif) y Cortada (Cor) son diferentes a otros tipos de minucias respecto a las frecuencias que presentaron, lo que tiene relación con el *heatmap* (general) correspondiente a cada tipo fundamental, donde el grupo con valores más altos representados con colores cálidos (naranja, amarillo y vino) son éstos dos tipos de minucias. Éste patrón se presentó en todos los tipos fundamentales, exceptuando el Arco, en el que se encontró que la única minucia diferente en su totalidad a otros tipos es la Cortada (Cor).

Dentro de los resultados obtenidos para cada tipo fundamental, se presentaron valores superiores del p -value al 0.05 (subrayados de color morado), mismos que permiten aceptar la hipótesis de no diferencia respecto a las frecuencias de las siguientes combinaciones formadas:

- Presilla externa: Empalme (Emp) vs Encierro (Enc) y Punto Intercrestal (Pinter), Desviación (Desv) vs Interrupción (Inter), Encierro (Enc) vs Punto Intercrestal (Pinter), Interrupción (Inter) vs Transversal (Trans) e Islote (Islo) vs Punto Intercrestal (Pinter) como se presenta en la Tabla 6.
- Presilla interna: Empalme (Emp) vs Encierro (Enc), Desviación (Desv) vs Interrupción (Inter) y Transversal (Trans), Interrupción (Inter) vs Transversal (Trans) e Islote (Islo) vs Punto Intercrestal (Pinter) (ver Tabla 7)
- Verticilo: Desviación (Desv) vs Interrupción (Inter) y Transversal (Trans), Empalme (Emp) vs Islote (Islo) y Punto Intercrestal (Pinter), Encierro (Enc) vs Punto Intercrestal (Pinter), Interrupción (Inter) vs Transversal (Trans) e Islote (Islo) vs Punto Intercrestal (Pinter) como se presenta en la Tabla 8.
- Arco: Bifurcación (Bif) vs Cortada (Cor), Empalme (Emp) vs Encierro (Enc), Desviación (Desv) vs Islote (Islo), Punto Intercrestal (Pinter) y Transversal (Trans), Interrupción (Inter) vs Transversal (Trans), Islote (Islo) vs Punto Intercrestal (Pinter) y Transversal (Trans), y Punto Intercrestal (Pinter) vs Transversal (Trans) (ver Tabla 9).

	Bif	Cor	Desv	Emp	Enc	Interr	Islo	Pinter
Cor	2.8e-06	-	-	-	-	-	-	-
Desv	<2e-16	<2e-16	-	-	-	-	-	-
Emp	<2e-16	<2e-16	1.1e-14	-	-	-	-	-
Enc	<2e-16	<2e-16	9.9e-14	0.70883	-	-	-	-
Interr	<2e-16	<2e-16	0.63168	2.5e-13	1.0e-12	-	-	-
Islo	<2e-16	<2e-16	0.00025	0.00225	0.00515	0.00013	-	-
Pinter	<2e-16	<2e-16	9.4e-06	0.24015	0.31068	4.0e-06	0.20376	-
Trans	<2e-16	<2e-16	0.43749	<2e-16	<2e-16	0.89973	1.6e-05	8.3e-07

Tabla 6. Valores de *p-values* de cada combinación de tipos de minucias para Presilla externa.

	Bif	Cor	Desv	Emp	Enc	Interr	Islo	Pinter
Cor	0.0101	-	-	-	-	-	-	-
Desv	<2e-16	<2e-16	-	-	-	-	-	-
Emp	<2e-16	<2e-16	1.1e-13	-	-	-	-	-
Enc	<2e-16	<2e-16	<2e-16	0.5504	-	-	-	-
Interr	<2e-16	<2e-16	0.6752	7.2e-10	3.9e-12	-	-	-
Islo	<2e-16	<2e-16	0.0040	8.5e-05	2.4e-06	0.0243	-	-
Pinter	<2e-16	<2e-16	0.0033	0.0283	0.0072	0.0104	0.5159	-
Trans	<2e-16	<2e-16	0.1430	<2e-16	<2e-16	0.0881	4.2e-05	9.1e-05

Tabla 7. Valores de *p-values* de cada combinación de tipos de minucias para Presilla interna.

	Bif	Cor	Desv	Emp	Enc	Interr	Islo	Pinter
Cor	1.0e-11	-	-	-	-	-	-	-
Desv	<2e-16	<2e-16	-	-	-	-	-	-
Emp	<2e-16	<2e-16	1.2e-15	-	-	-	-	-
Enc	<2e-16	<2e-16	<2e-16	0.01151	-	-	-	-
Interr	<2e-16	<2e-16	0.85021	3.2e-11	<2e-16	-	-	-
Islo	<2e-16	<2e-16	2.5e-09	0.13018	0.00021	9.8e-08	-	-
Pinter	<2e-16	<2e-16	5.2e-10	0.61198	0.20615	6.2e-09	0.18078	-
Trans	<2e-16	<2e-16	0.11545	<2e-16	<2e-16	0.28520	3.9e-13	5.8e-13

Tabla 8. Valores de *p-values* de cada combinación de tipos de minucias para Verticilo.

	Bif	Cor	Desv	Emp	Enc	Interr	Islo	Pinter
Cor	0.1205	-	-	-	-	-	-	-
Desv	<2e-16	<2e-16	-	-	-	-	-	-
Emp	<2e-16	6.2e-13	1.3e-08	-	-	-	-	-
Enc	<2e-16	1.2e-13	4.6e-06	0.5184	-	-	-	-
Interr	<2e-16	<2e-16	0.0301	4.5e-15	9.0e-11	-	-	-
Islo	<2e-16	<2e-16	0.9258	8.3e-09	5.1e-06	0.0417	-	-
Pinter	<2e-16	8.0e-14	0.2283	0.0018	0.0252	0.0076	0.2720	-
Trans	<2e-16	<2e-16	0.4266	1.6e-10	2.3e-07	0.2167	0.4399	0.0874

Tabla 9. Valores de *p-values* de cada combinación de tipos de minucias para Arco.

A partir de los datos obtenidos de ésta prueba se puede decir que en general, las minucias que en cantidad de apariciones son estadísticamente diferentes a otras, son las Bifurcaciones y las Cortadas lo que concuerda con los valores de frecuencias generales, al ser las dos con mayor cantidad de registros. Lo que concierne a las combinaciones con valores estadísticamente no diferentes ($p\text{-values} > 0.05$), se encontró que existen combinaciones

presentes en todos los tipos fundamentales, cómo el Islote (Islo) vs Punto Intercrestal (Pinter) y la Interrupción (Inter) vs Transversal (Trans), mientras que los tipos de minucias que presentaron mayor cantidad de similitudes con otras fueron: Punto Intercrestal (Pinter) (10 combinaciones), Desviación (Desv) (8 combinaciones), Interrupciones (Inter) e Islotes (Islo) (ambas con 7 combinaciones) y el Empalme (Emp) (6 combinaciones); es importante aclarar que esta *no diferencia* es respecto a la frecuencia de aparición de cada minucia y no está en función de su morfología, **sin embargo, combinaciones como Islote vs Punto intercrestal, podrían interpretarse como la existencia de cierta relación estructural**, por lo que sería pertinente en futuras investigaciones, explorar la relación que pudiera existir entre estos tipos de minucias para fines de acotar criterios de identificación.

Antes de continuar es importante aclarar que una agrupación *no diferente* nos dice que el comportamiento estadístico de las frecuencias para esas minucias es homogéneo, por lo que un tipo fundamental con muchas agrupaciones/combinaciones homogéneas no tendría relaciones lo suficientemente fuertes como para formar asociaciones representativas. Ahora bien, si los datos presentados para la prueba POST HOC se conjuntan con la información obtenida de los *heatmaps*, podría decirse que ciertamente, el Arco es el tipo fundamental que mayor cantidad de combinaciones *no diferentes con nueve* por lo que es lógico que formará menor cantidad de asociaciones en el clúster del *heatmap* y con ello una menor cantidad de tipos de minucias (Imagen 28). En lo que respecta al Verticilo y la Presilla externa, se observa que tienen un comportamiento similar al haber formado siete y seis combinaciones respectivamente, mostrando (en el clúster del *heatmap*) la misma cantidad y los mismos tipos de minucias. Finalmente, en la Presilla interna se formaron cinco combinaciones *no diferentes* resultandos en una minucia más que el Arco y dos menos que el Verticilo y la Presilla externa (ver Imagen 28).

De la información presentada para el análisis de la variabilidad de los tipos de minucias respecto al tipo fundamental, se puede decir que los tipos fundamentales con mayor variabilidad de minucias es el Verticilo y la Presilla Externa, seguido de la Presilla Interna y el Arco, de igual manera, se encontró que el número mínimo de minucias que presentaron asociaciones representativas en todos los tipos fundamentales son seis: Bifurcación, Cortada,

Punto Intercrestal, Encierro, Empalme e Islote, sin embargo, tres tipos de minucias más correspondientes a la Interrupción, la Transversal y la Desviación también mostraron asociación estadística en más de un tipo fundamental. Derivado de éstas premisas y con fundamento estadístico, sería oportuno poder contemplar en los análisis dactiloscópicos éstas nueve minucias ya que cómo se observa en los resultados mostrados aportan información relevante para la caracterización de cada tipo fundamental.

Variabilidad por sexo

Para explorar la variabilidad de los tipos de minucias en función del sexo (Hombres y Mujeres) se partió de las frecuencias relativas de cada tipo (ver Tabla 4; Anexo), a fin de obtener aquellas cuyo porcentaje superara el 0.5% del valor total de minucias registradas, obteniendo así un total de 10 minucias correspondientes a Cortada, Bifurcación, Punto Intercrestal, Encierro, Islote, Empalme, Interrupción, Desviación, Transversal y Cuña. Para el análisis de los datos se realizaron dos Análisis de Componentes Principales, uno para cada sexo.

Análisis de Componentes Principales (ACP) para Hombres.

Para la muestra correspondiente al sexo masculino se obtuvieron un total de diez componentes principales, los valores de cada uno se muestran en las Tablas 5 y 6 en el Anexo.

Como se mencionó en el apartado de *Análisis Estadísticos*, un ACP es útil para reducir las variables originales sin perder información respecto al fenómeno estudiado. Para poder determinar cuáles son los Componentes Principales (CP) que explican la variabilidad de la muestra, se procedió a realizar el cálculo de los *eigenvalues* o valores propios, para fines interpretativos, recordemos que a valores más altos mayor cantidad de información retenida en el CP. En la Tabla 10 y el Gráfico 30 se puede observar que los CP que contienen la mayor cantidad de variación es el componente 1 (Dim1), seguido del componente 2 (Dim2), mismos que representan en conjunto el 77.88% de la variación total del tipo de minucia respecto al sexo masculino.

<i>Componente principal</i>	<i>Eigenvalue</i>	<i>Varianza</i>	<i>Varianza acumulada</i>
<i>Dimensión 1</i>	190.1647353	57.4940515	57.49405
<i>Dimensión 2</i>	67.4441292	20.3909323	77.88498
<i>Dimensión 3</i>	43.4336118	13.1316372	91.01662
<i>Dimensión 4</i>	14.3119630	4.3270522	95.34367
<i>Dimensión 5</i>	4.8029094	1.4521027	96.79578
<i>Dimensión 6</i>	3.5774459	1.0815983	97.87737
<i>Dimensión 7</i>	3.3402061	1.0098717	98.88725
<i>Dimensión 8</i>	1.9745860	0.5969927	99.48424
<i>Dimensión 9</i>	1.1452788	0.3462615	99.83050
<i>Dimensión 10</i>	0.5606306	0.1695000	100.00000

Tabla 10. Valores propios por componente principal o dimensión, para el sexo masculino.

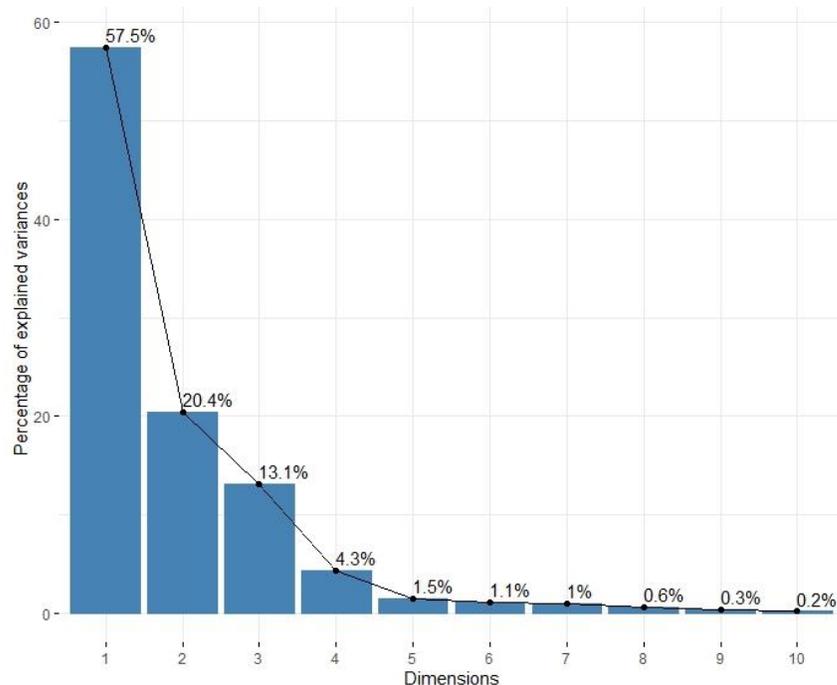


Gráfico 30. Gráfico de sedimentación de varianzas con el porcentaje de variación que tiene cada CP para sexo masculino.

En el Gráfico 31 se observan las contribuciones de las variables (minucias) en cada componente principal (Dim.), las cuales se encuentran representadas con círculos dentro del recuadro. Como puede apreciarse, las primeras siete variables (Cortadas, Bifurcaciones, Puntos Intercrestales, Encierros, Islotes, Empalmes e Interrupciones) son las que mayor contribución tienen en función del tamaño y color que presentan respecto a las columnas y filas, siendo la Cortada (Cor) la que mayor contribución presenta en la Dim. 1, mientras que en la Dim. 2 y 3 se observa la Bifurcación (Bif) y el Punto Intercrestal (Pinter) en mayor proporción; el criterio de selección de las siete variables antes mencionadas se basa en la premisa de que las variables que no se correlacionan con ninguna dimensión o lo hacen con las últimas son variables de baja contribución y podrían eliminarse para simplificar el análisis general. Conocer ésta información permite tomar decisiones objetivas sobre qué variables y qué componentes utilizar para que, en conjunto, se pueda abstraer la mayor variabilidad de la muestra sin que haya pérdida de información, por lo anterior, para conocer el comportamiento de la población correspondiente al sexo masculino, se puede observar el Gráfico 32, donde destaca en tonalidad turquesa la Cortada (Cor) al presentar una influencia positiva en la Dim 1. y al estar distanciada de las demás minucias, de igual manera, se muestra

un patrón de correlación para las variables Islo (Islo) y Punto Intercrestal (Pinter). Referente al componente o Dim. 2, se observa que la minucia con mayor influencia es la Bifurcación (Bif), seguido del Encierro (Enc) y el Empalme (Emp) que muestran un comportamiento similar entre sí. Conjuntando ésta información con la distribución muestral, (Ver Gráfico 33) se observa que la dispersión de los individuos forma dos conglomerados, uno con menor cantidad de individuos centrados en el eje negativo de la Dim. 2, respecto al otro cuyos elementos se observan en mayor cantidad y mayor dispersión.

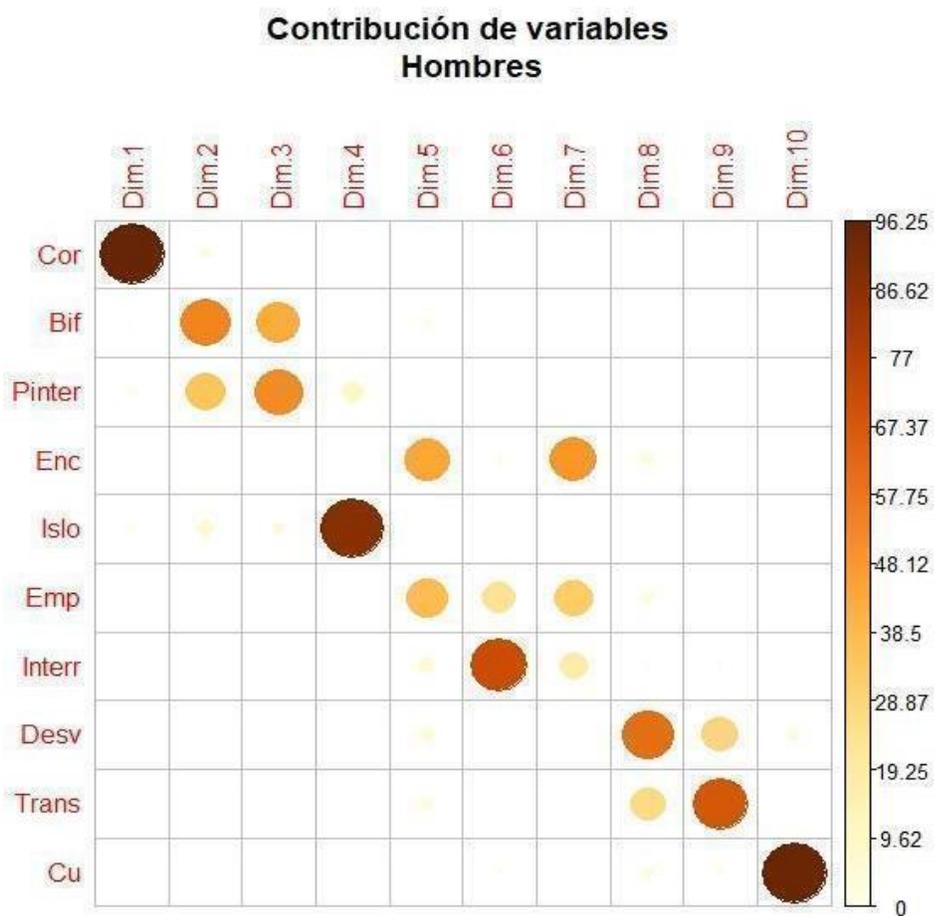


Gráfico 31. Gráfico de contribución de variables que muestra el aporte de cada tipo de minucia en las dimensiones establecidas (CP), para el sexo masculino.

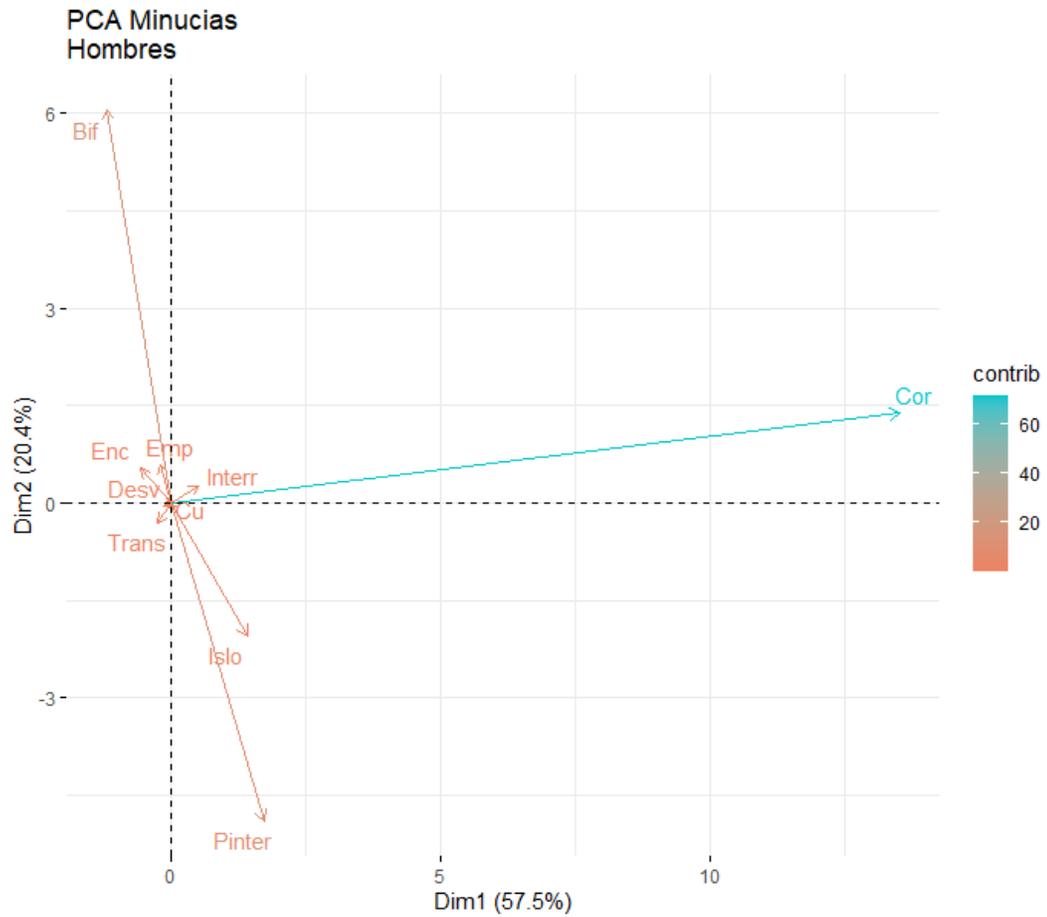


Gráfico 32. Análisis de Componentes Principales en los CP 1 y el 2 (representación de variables), que explican el 77.9% del comportamiento de las siete variables elegidas para el sexo masculino.

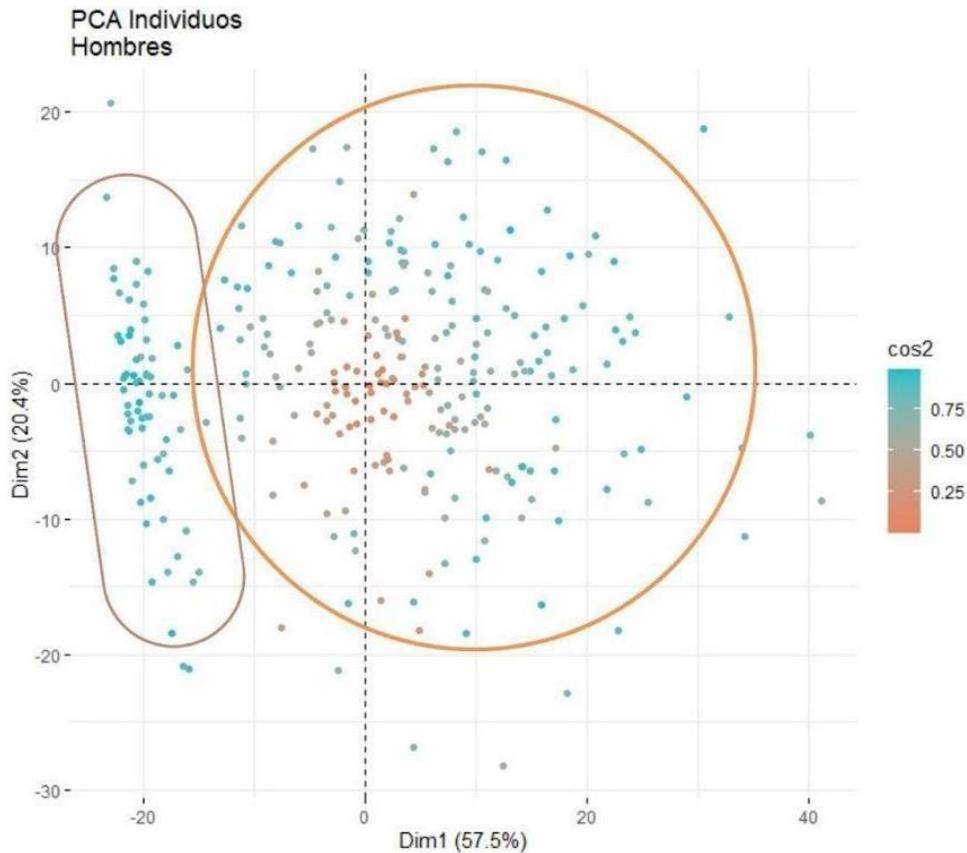


Gráfico 33. Análisis de Componentes Principales en los CP 1 y 2 (representación individuos), que explican el 77.9% del comportamiento de los 150 individuos del sexo masculino.

Análisis de Componentes Principales para Mujeres

Ahora bien, para el caso de la variabilidad de minucias respecto al sexo femenino se obtuvieron un total de diez componentes principales, los valores de cada uno se muestran en las Tablas 7 y 8 del Anexo.

Para la determinación de qué Componentes Principales (CP) explican la mayor variabilidad de la muestra, se procedió a realizar el cálculo de los *eigenvalues* o valores propios. En la Tabla 11 y Gráfico 34, puede observarse que los CP que contienen la mayor cantidad de variación es el 1 (Dim.1), seguido del 2 (Dim2), mismos que representan en conjunto el 69.32% de la variación total del tipo de minucia respecto al sexo femenino.

<i>Componente principal</i>	<i>Eigenvalue</i>	<i>Varianza</i>	<i>Varianza acumulada</i>
<i>Dimensión 1</i>	94.1760369	50.6328181	50.63282
<i>Dimensión 2</i>	34.7691604	18.6932964	69.32611
<i>Dimensión 3</i>	28.4706674	15.3069737	84.63309
<i>Dimensión 4</i>	12.1181586	6.5152085	91.14830
<i>Dimensión 5</i>	5.1254261	2.7556348	93.90393
<i>Dimensión 6</i>	4.6193339	2.4835394	96.38747
<i>Dimensión 7</i>	3.4406374	1.8498248	98.23730
<i>Dimensión 8</i>	1.6947308	0.9111553	99.14845
<i>Dimensión 9</i>	1.2032274	0.6469034	99.79535
<i>Dimensión 10</i>	0.3806367	0.2046456	100.00000

Tabla 11. Valores de eigenvalues por componente principal o dimensión, para el sexo femenino.

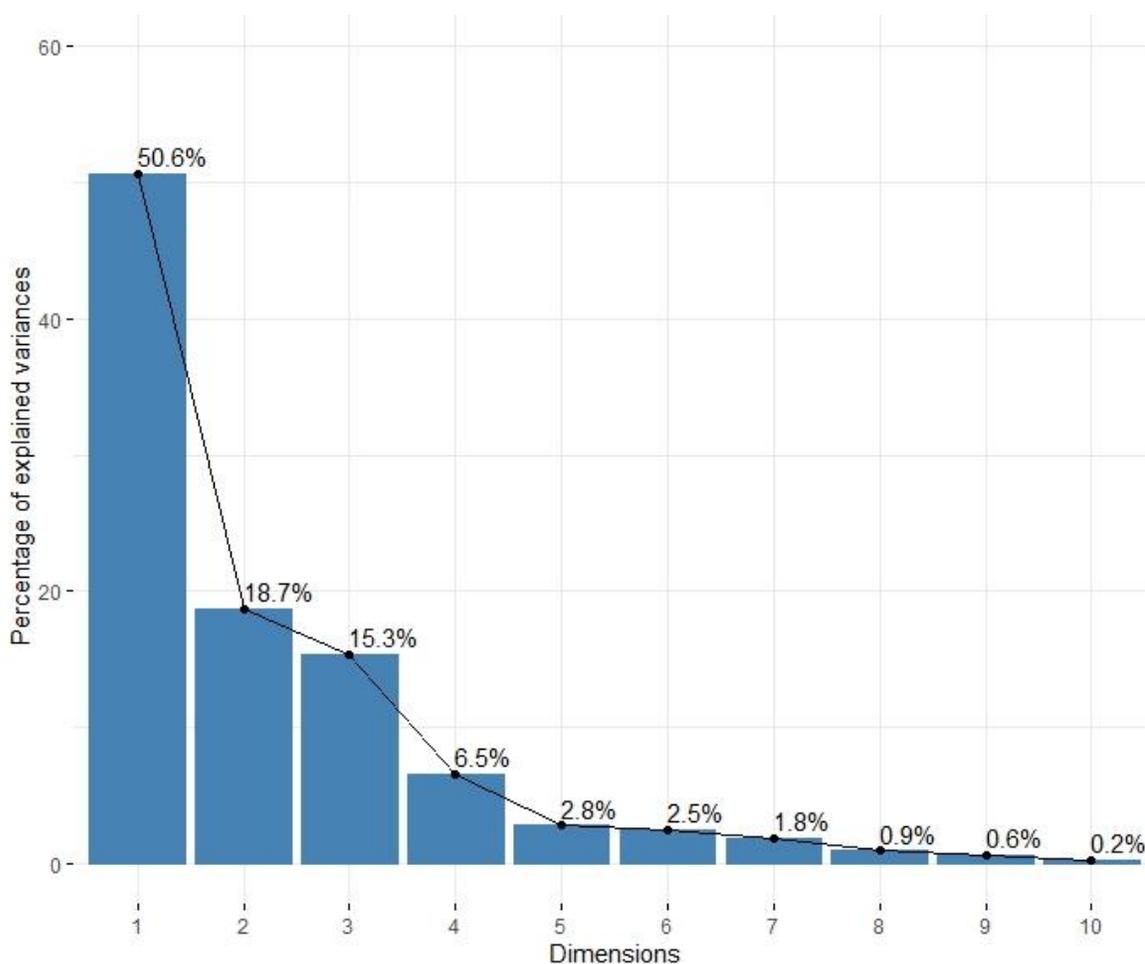


Gráfico 34. Gráfico de sedimentación de varianzas con el porcentaje de variación de cada CP o dimensión para sexo femenino.

En el Gráfico 35 se observan las contribuciones de las variables en cada Componente Principal o dimensión (Dim.). Como puede apreciarse, las primeras tres variables (Cortadas,

Bifurcaciones y Puntos Intercrestaes) son las que mayor contribución tienen a los primeros tres componentes (Dim. 1, Dim. 2 y Dim. 3), mientras que en posteriores se observa una alta contribución esporádica para los demás tipos de minucias, es importante aclarar que el criterio de selección de las variables para el sexo femenino que se ocupó en éste ACP es el mismo que el del sexo masculino, a fin de explorar el comportamiento de las mismas minucias para ambos sexos. Con la información anterior, se obtuvo el Gráfico 36, donde destaca en tonalidad morada la Cortada (Cor) al presentar una influencia negativa en la Dim 1. y al estar separada de las demás minucias, de igual manera, se muestra un patrón de correlación para las variables Islo (Isl) y Punto Intercrestal (Pinter). Referente al CP2 o Dim. 2 se observa que la minucia con mayor influencia es la Bifurcación (Bif), seguido de Encierro (Enc) y Empalme (Emp) que muestran un comportamiento similar entre sí. Conjuntando ésta información con la distribución muestral, se observa que la dispersión de los individuos es homogénea en todo el gráfico (ver Gráfico 37).

En suma, no se encontraron diferencias relevantes entre sexos respecto al patrón de agrupamiento de los diferentes tipos de minucias analizadas, pero sí en la distribución de sus minucias por los individuos del sexo masculino.

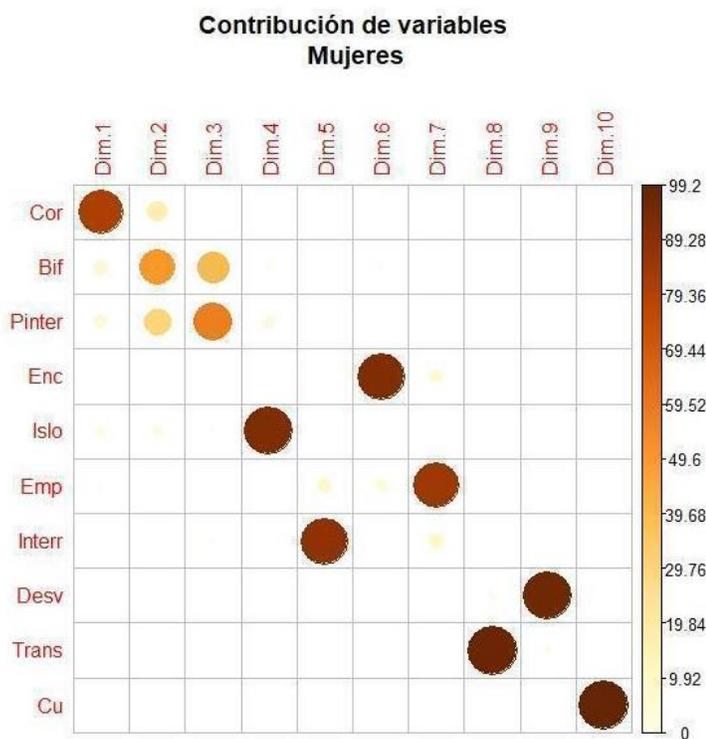


Gráfico 35. Gráfica de contribución de variables con el aporte que tiene cada tipo de minucia en las dimensiones establecidas (CP), para el sexo femenino.

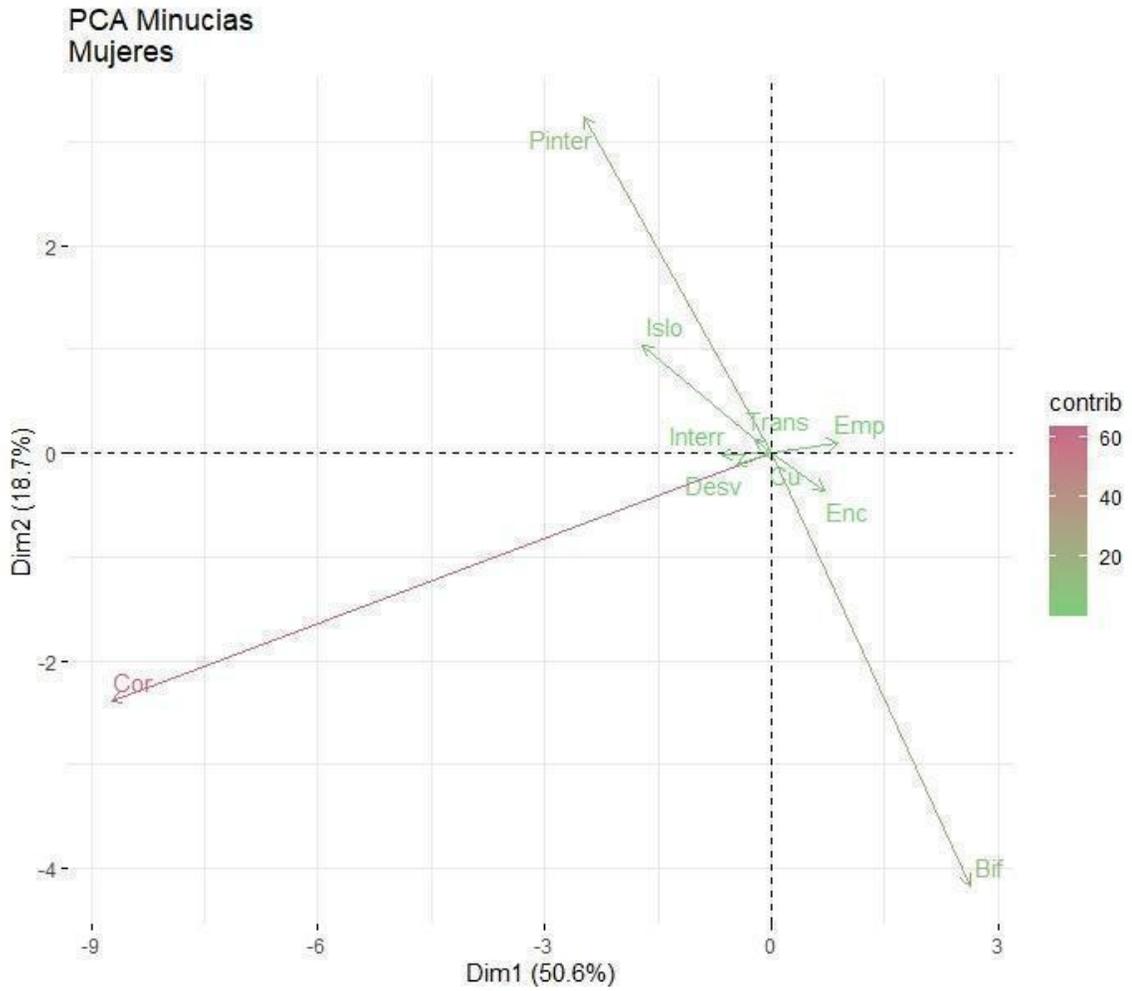


Gráfico 36. Análisis de Componentes Principales en los CP 1 y 2 (representación de variables), que explican el 69.3% del comportamiento de las siete variables elegidas para el sexo femenino.

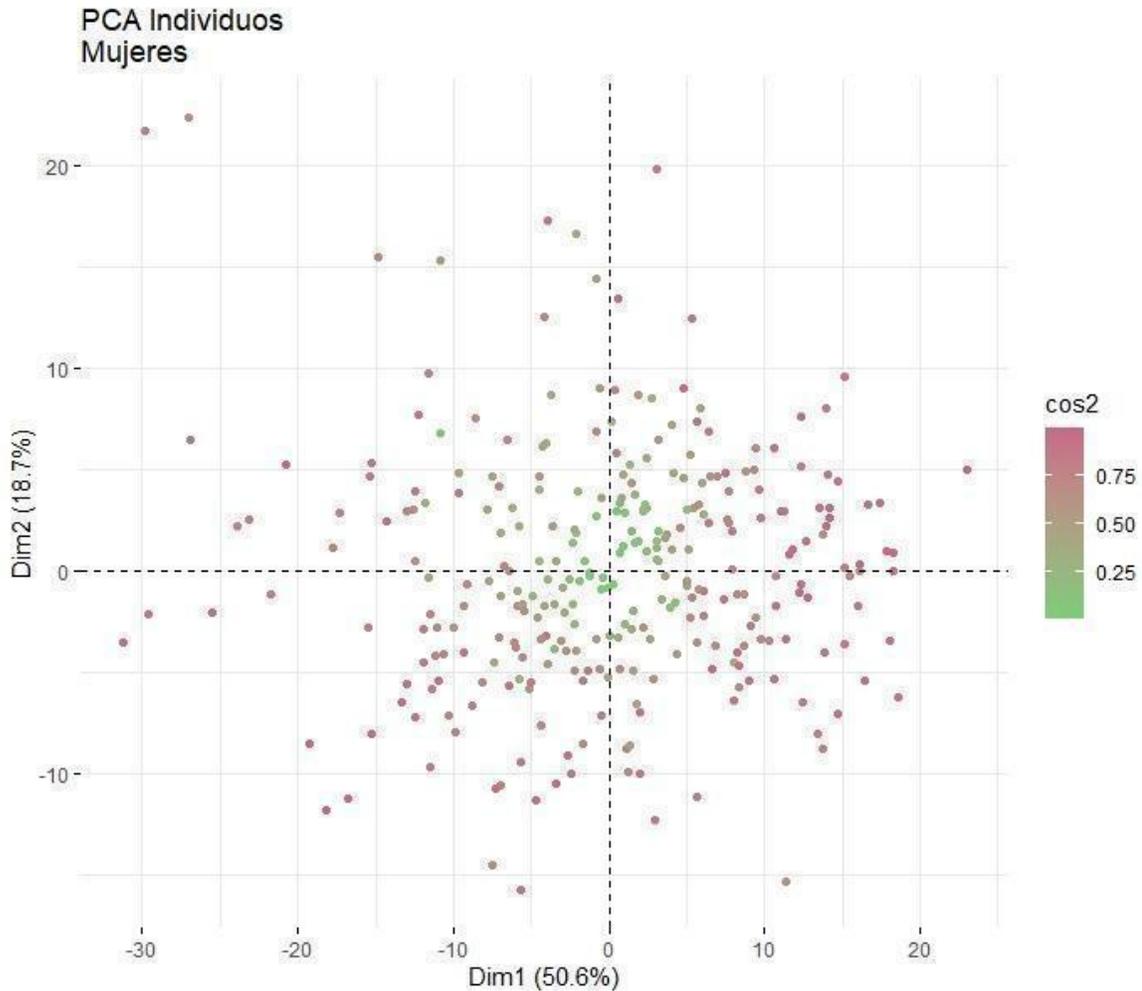


Gráfico 37. Análisis de Componentes Principales en los CP 1 y 2 (representación de individuos), que explican el 69.3% del comportamiento de los 150 individuos del sexo femenino.

Siguiendo con el análisis de los 10 tipos de minucias (Cortada, Bifurcación, Punto Intercrestal, Encierro, Islote, Empalme, Interrupción, Desviación, Transversal y Cuña) al ser los que explican la mayor variabilidad de la muestra total y con la finalidad de obtener la mayor información posible, se obtuvieron las frecuencias absolutas y relativas de cada una para hombres y mujeres, mismas que se observan en la Tabla 9 del Anexo y en la Imagen 29, donde se aprecia que, de manera general, el sexo masculino presenta mayor cantidad de minucias respecto al sexo femenino, a excepción de las Cortadas (Cor) que superan por un 2.2% (774 minucias) respecto al valor total de los tipos de minucias utilizados para el ACP (34,308 registros). De igual manera, se encontraron diferencias en las Bifurcaciones (2.1%) y en los Puntos Intercrestales (1.1%), siendo el sexo masculino el de mayor prevalencia para ambas minucias.

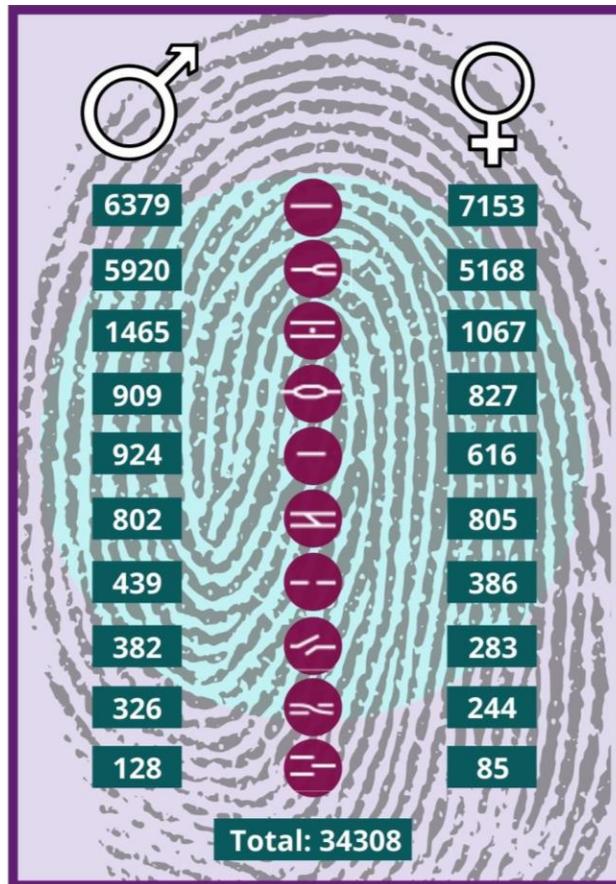


Imagen 29. Frecuencias absolutas de cada uno de los diez tipos de minucias contemplados para la variabilidad por sexo.

Claro está que el sexo masculino mostró una cantidad de minucias mayor que las mujeres, sin embargo, con la finalidad de saber a detalle si éstas diferencias eran estadísticamente significativas se procedió a realizar la prueba U de Mann Whitney para las variables (minucias) que mayor contribución tienen para explicar la variabilidad de la muestra de acuerdo al análisis de componentes principales, se plantearon las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula	Las características dermatoglíficas (minucias) del sexo masculino no son diferentes a las del sexo femenino.
Hipótesis alternativa	Las características dermatoglíficas (minucias) del sexo masculino son diferentes a las del sexo femenino.

Los *p-values* obtenidos del estadístico se muestran en la Tabla 12, a partir de los cuáles se puede concluir con un nivel de confianza del 95% que se rechaza la hipótesis nula ($p\text{-values} < 0.05$), obteniendo que las minucias que muestran diferencias significativas entre sexos son las Cortadas, Bifurcaciones, Puntos Intercrestales, Islotes, Interrupciones, Desviaciones, Transversales y Cuñas, siendo las Bifurcaciones y los Islotes los de mayor significancia, por lo contrario, las minucias que no muestran diferencias estadísticamente significativas ($p\text{-values} > 0.05$) entre sexos son los Encierros y los Empalmes.

<i>Tipo de minucia</i>	<i>P-value</i>
<i>Cortada</i>	0.006758**
<i>Bifurcación</i>	9.271e-05***
<i>Punto Intercrestal</i>	0.003878**
<i>Encierro</i>	0.06053
<i>Islote</i>	3.882e-06***
<i>Empalme</i>	0.9042
<i>Interrupción</i>	0.003488**
<i>Desviación</i>	0.001081**
<i>Transversal</i>	0.003615**
<i>Cuña</i>	0.008412**

Significancia: *** 0.001, ** 0.01, * 0.05

Tabla 12. *P-values* obtenidos del análisis estadístico U de Mann Whitney para diferencia de sexos respecto al tipo de minucia.

DISCUSIÓN

No está a discusión que la dactiloscopía, derivado de la practicidad en lo que respecta al tiempo, recursos y precisión del estudio de las huellas dactilares, y de su sustento en los principios de perennidad, inmutabilidad, diversidad y clasificabilidad (Trujillo, 2007, Vucetich, 1904), ha sido una de las disciplinas forenses más utilizadas a lo largo de la historia para la determinación de la identidad humana en diversos ámbitos, que van desde el forense hasta contextos de seguridad, comercio, acceso a dispositivos digitales, identificación oficial, entre otros.

No está a discusión que existe una amplia cantidad de huellas dactilares/biométricos en bases de datos cuyos lineamientos de recopilación, sistematización, almacenamiento, intercambio y resguardo de información dependen de cada institución que la posee. No está a discusión que éstas bases de datos no han sido analizadas, lo que representa una limitación para el conocimiento de características dermatoglíficas en nuestra población, situación que ha intentado ser subsanada por trabajos como los de Serrano (1969, 1982), García-Cuevas (2017), Muñoz (2018) y la presente investigación.

No está a discusión que el conocimiento de la variabilidad biológica del tipo de minucia y de los tipos fundamentales aporta información relevante a la antropología, a la dactiloscopía y a la dactiloscopología, tanto para el saber de las diferencias entre poblaciones cómo para la obtención de estándares numéricos propios de cada una y el desarrollo de metodologías de análisis que contemplen los factores relacionados al error humano, y que empleen herramientas estadísticas, a fin de forjar una base sólida para el proceso de identificación y a su vez otorgar mayor peso a la evidencia de las huellas dactilares. Pero entonces... ¿en qué consiste la discusión?

La discusión radica en responder a preguntas como ¿cuál es el aporte del análisis de bases de datos de biométricos dactilares para la identificación humana?, ¿por qué es importante el uso de herramientas estadísticas en el análisis dactiloscópico y cómo impacta en él, el factor de error humano?, ¿se puede afirmar que el tipo de impresión dactilar influye en la

caracterización de una población?, ¿por qué es importante desarrollar protocolos de análisis de impresiones dactilares y cuál es su impacto en la identificación de personas? entre muchas otras preguntas más.

Error intraobservador en la dactiloscopía

"Nosotros hicimos nuestro trabajo y cometimos un error, así es cómo me gusta pensarlo, como un error honesto. Predicaré las huellas dactilares hasta que muera, son infalibles. Yo me considero uno de los mejores en el mundo" - Palabras de John Massey, examinador de huellas dactilares en el FBI, quien participó en la investigación del caso de Brandon Mayfield relacionado erróneamente por el FBI con la perpetración directa del atentado con bomba en un tren de Madrid, España (Zabel, 2005).

Mantener estándares altos de evidencia forense es vital para un sistema de justicia efectivo, para garantizar la praxis basada en evidencia científica de las y los expertos y para evitar que inocentes sean acusados injustamente o bien se hagan identificaciones erróneas en personas desaparecidas, es necesario que cada ciencia o disciplina forense reconozca sus áreas de oportunidad y las atienda en función de las recomendaciones emitidas por el organismos internacionales (PCAST, 2006; NIST, 2012; AAAS, 2017; Alcoceba, 2018) a fin de elevar el escrutinio científico de los estudios forenses al reconocer y hacer notar tanto para el gremio científico como para el jurídico que la ciencia forense no es infalible, y que en medida de lo posible deben tener claros los alcances y las limitaciones de cada una de las pruebas que forman parte de una investigación. La singularidad biológica de las huellas dactilares es la premisa que da sustento científico a los resultados de los métodos de comparación de características como el ACE-V, sin embargo, experiencias a lo largo de la historia han desvelado una serie de factores que influyen en el análisis dactiloscópico, desencadenado a su vez estudios relacionados a la exploración de aspectos cómo la exactitud de quien realiza el análisis, los estándares y normas de la praxis así cómo la calidad y cantidad de información mínima que se precisa en las impresiones dactilares para ser aptas de estudio.

¿Cómo impacta el factor humano en los análisis dactiloscópicos? Se han desarrollado investigaciones para conocer la exactitud de las y los expertos en huellas dactilares, donde se han reportado tasas bajas de identificaciones falsas que van desde el 0 al 2.6%; pero tasas

altas de exclusiones falsas que van desde el 2.9% al 28%, una identificación falsa es la conclusión errónea de que las impresiones realizadas por diferentes personas tienen la misma fuente; una exclusión falsa es la conclusión errónea de que las impresiones realizadas por la misma persona tienen diferentes fuentes (Dror et. al, 2006, 2011; Pacheco, 2014, Ulery et. al. 2011, Hicklin, 2020). Estas tasas de error sólo son un panorama general, ya que sería un desacierto extrapolarlas a todas las y los examinadores del mundo, porque las metodologías de análisis de confronta uno a uno (1:1) pueden diferir entre regiones y eso es sólo un ejemplo de un factor que no permite generalizar los resultados, sin embargo, no deja de ser un indicativo de que las identificaciones y las exclusiones erróneas existen en el campo de la dactiloscopia, en atención a ésta situación y derivado de que un MCC es de naturaleza comparativa, es imperativo el establecimiento de un protocolo que permita evaluar de manera metódica y periódica el error intraobservador de personal activo en servicios periciales.

El rendimiento y la precisión de los y las expertas es motivo de atención en casi todas las áreas forenses. Un o una experta necesita no solo conocimiento, sino también habilidad y experiencia para evaluar e interpretar correctamente la información que se presente, sin embargo, ser un experto no significa necesariamente un rendimiento sin errores, ya que como todo ser humano, están expuestos a cambios cognitivos, psicológicos y contextuales que pueden afectar y distorsionar la visualización de características, su evaluación y la toma de decisiones respecto a ellas (Dror y Charlton, 2006; Dror et. al, 2010, Langenburg et. al. 2009; James-Charlton, 2011), o también en el caso específico del análisis dactiloscópico pueden enfrentarse a impresiones con poca calidad y cantidad de información derivado de los efectos producidos por la deposición del dedo sobre una superficie, como la presión, distorsión y superposición de las crestas, así como la instrumentación y las técnicas empleadas para la toma de muestra (Ashbaugh, 1999), lo que dificulta la identificación de características individualizantes, tales como las minucias (Nivel 2 de análisis) y los poros (Nivel 3 de análisis).

Para dar control o validez interna y confiabilidad a la metodología de una investigación y a los resultados de cualquier estudio es requisito conocer el nivel de error asociado al análisis (Hernández-Sampieri, 2014), por lo que en la Academia realizar el cálculo del error intraobservador es una práctica normalizada, se tienen como prueba estudios que contemplan

dentro de su metodología herramientas estadísticas para el cálculo del error en áreas como la antropología forense (Konigsberg, et. al, 2006; Suazo, et. al., 2009; Pérez, et. al. 2004), la odontología forense (Jasso, 2019; Quinto-Sánchez et. al., 2022; Suárez-Canlla, 2021) y la dactiloscopia (Baryah y Krishan, 2020; Dipierri et. al. 2018; Ahmed y Osman, 2016; Ishak et. al 2012), en cada una de las investigaciones citadas el error intraobservador se calculó a partir de distintos estadísticos, lo que nos dice que existen varias opciones de conocerlo y reportarlo cuantitativamente.

En la presente investigación se realizó a partir del Acuerdo Observado que fue interpretado en función del Índice Kappa de Cohen también empleado en la investigación de Baryah y Krishan (2020) -para el cálculo del error intraobservador en el análisis de huellas dactilares de apoyo-, en complemento con el Coeficiente de Rho Spearman; el uso de estos dos estadísticos permitió reportar de manera categórica y numérica un error intraobservador de Acuerdo Observado "Casi perfecto" y "perfecto" bajo el criterio del Índice Kappa y una asociación "Perfecta" para el coeficiente Rho. La ventaja de usar estas dos herramientas estadísticas es que, si es necesario verificar el error de medición, con los valores del Acuerdo se sabe de manera detallada cuáles son los elementos de la muestra que están causando dichos errores, aunado a que con los valores del Índice Rho se conoce cuál es el nivel de asociación entre una observación y otra, obtener ambos datos estadísticos permite comprender de manera objetiva el rendimiento de la o el observador/experto, de tal manera que al realizar una exploración profunda se puedan conocer las razones que motivan los errores, a fin de que él o la investigadora pueda mitigarlos antes de realizar su estudio.

Pero ¿qué sucede en el ámbito de la praxis pericial? Caminar hacia dictámenes cuyas conclusiones sean cada vez más cuantitativas y no categóricas, implica a su vez la responsabilidad profesional de reconocer a la Dactiloscopia como una disciplina que necesita de herramientas estadísticas que sustenten los resultados en hechos científicos y no en opiniones. Lo anterior no debe entenderse como una desvalorización de la experiencia de los y las expertas en huellas dactilares ya que este punto también ha sido motivo de investigaciones en el área, encontrando una correspondencia positiva entre la experiencia y/o formación de los y las observadoras y el nivel de error en un análisis (Thompson, et. al, 2013; 2017), al contrario, debe de abordarse como la oportunidad de unir esfuerzos para atender

recomendaciones (PCAST, 2016; AAAS, 2017) y a su vez forjar buenas prácticas periciales e incrementar el escrutinio científico a partir de metodologías basadas en evidencia, desde la evaluación del nivel de error intraobservador, hasta el uso de herramientas estadísticas cuyos resultados guíen objetivamente la toma de decisiones de la o el experto.

A manera de prospectiva/propuesta, un protocolo de actuación para el cálculo del error intraobservador podría ser incluido como un examen sistemático y periódico que forme parte de la fase de Verificación de la metodología ACE-V, en dónde se consideren como ejes rectores los siguientes puntos:

- Debe ser un estudio a ciegas, es decir, los y las expertas no deben conocer los resultados de las pruebas que se realicen (PCAST, 2016), a fin de que su juicio no se vea sesgado y favorezca las buenas prácticas científicas.
- El estudio debe ser efectuado o supervisado por individuos o instituciones independientes a la de origen que no tengan interés en el resultado (AAAS, 2017).
- Debe establecerse un periodo de tiempo fijo para la repetición de la prueba, ya que al implicar tiempo y recursos de la institución y del personal, no resulta práctico su realización rutinaria (Champod et. al 2004), exceptuando aquellas comparaciones que por complejidad de las huellas representen una problemática.
- Deben emplearse recursos estadísticos (PCAST, 2016; AAAS, 2017) para la cuantificación del error intraobservador, un ejemplo sencillo y efectivo es a partir del Acuerdo Observado, el Índice Kappa de Cohen y el Coeficiente de Rho Spearman.
- Considerando que la calidad (distorsión, presión y nitidez de las crestas), el medio de depósito de la huella y la cantidad de información (tamaño de la huella) que presentan los diferentes tipos de impresiones dactilares (de apoyo, rodada y fragmentos) influyen en el examen de los diferentes niveles de detalle (AAAS, 2017) se deben contemplar en las muestras problema huellas con estándares de calidad altos tales como los que solicitan organismos como el NIST (2019) y huellas con calidad media y baja como las que son encontradas en lugares de intervención forense (AAAS, 2017; Loyola, 2021), esto es de suma importancia porque la calidad deficiente de una impresión debe reconocerse como una fuente inevitable de error al hacer comparaciones, y por ende medir dicho error es una base cuantitativa sólida

que pone en atención a quién aún siga pensando que la evidencia de las huellas dactilares es infalible o que no necesita sustento estadístico.

- La Verificación se realiza a partir del examen posterior de las impresiones por un segundo experto que da como resultado la confirmación de la conclusión del experto inicial (Langenburg, 2009), casos como el de Brandon Mayfield evidencia la influencia que puede tener el sesgo contextual en el análisis de la huella aunado a que, quién realiza la verificación sigue siendo un ser humano, situación por la que un segundo análisis no exime el cálculo del error intraobservador.

Es imperativo aclarar que los puntos desarrollados son una propuesta ante la necesidad de cuantificar y considerar la tasa de error conocida o potencial en los dictámenes dactiloscópicos, sin embargo, aún no se han desarrollado dichos instrumentos que, para poder ser aplicados, deben pasar por filtros de validación científica, tal como lo establecen los criterios de Daubert.

Caracterización de la variabilidad dermatoglífica de biométricos dactilares

De acuerdo con el World Population Prospects realizado por la Organización de las Naciones Unidas en 2019, y con el Population clock a cargo del Departamento de Censos de los Estados Unidos, existen en el mundo alrededor de 7,800 millones de personas (Census, 2022). En este momento sería oportuno que la o el lector mire la huella natural de cualquiera de sus dedos y piense simultáneamente en los principios de diversidad y unicidad de la Dactiloscopía (Trujillo, 2007, Ashbaugh, 1999), siguiendo la lógica podría decirse que dentro del total de personas en el mundo, en cualquier línea temporal no ha existido, no existe y no existirá un sólo individuo que tenga una huella dactilar igual a la que está observando, pero... ¿se han analizado todas las huellas de la población del mundo para comprobar dichos principios? la respuesta sin duda es negativa, sin embargo, no es una tarea necesaria, a continuación se explicará la razón.

Cuando se hace un análisis dactiloscópico uno a uno (1:1) o bien una huella comparada con una base de datos (1: n), se realizan las comparaciones pertinentes en función de los niveles de detalle que presenten las huellas, a medida que aumentan las coincidencias o exclusiones

entre los tipos fundamentales y minucias de la muestra dubitada e indubitada, también aumenta la posibilidad de no observar el mismo arreglo de características en la impresión de una muestra diferente a la analizada. En la praxis, siguiendo la idea del párrafo anterior, el o la experta en huellas dactilares, lograría llegar a una individualización confiando o dando un “voto de fe” en que las impresiones equivalentes a aproximadamente 7,800 millones de personas, no coincidirían con las que se están analizando. Es ahora cuando resulta pertinente cuestionarnos sobre la científicidad de conclusiones como “los patrones de características en las impresiones analizadas son provenientes de la misma fuente” porque, aunque no se coloque textualmente en un dictamen, se está excluyendo de manera deliberada la información poblacional, pero ¿por qué es importante no dejar de lado el peso poblacional?

En el ámbito forense, en las ciencias o disciplinas que utilizan métodos de comparación de características (MCC), una alternativa es emplear herramientas estadísticas para cuantificar la fuerza de una conclusión, que comúnmente se derivan a partir del uso de la probabilidad - posibilidad de que ocurra un evento basado en un conjunto de datos previos (Kallenberg, 2002); un ejemplo popular y referente en la comunidad científica es la genética forense, donde a partir de la Razón de Verosimilitud o Likelihood ratio (LR por sus siglas en inglés) se calcula el peso de la evidencia del DNA (Villalobos, 2018), el uso de ésta herramienta es el resultado de estudios poblacionales que permiten conocer la frecuencia y el porcentaje de aparición de características del DNA presentes en cierto porcentaje de la población, es decir, cierto fragmento de DNA (alelo) puede aparecer con mayor o menor frecuencia en una población de mujeres mexicanas que en una población de mujeres chinas y con ello proporcionar un elemento objetivo de discriminación; esto evidencia que el uso de herramientas estadísticas es significativo cuando se conocen las características de la población de interés (NIST, 2012; Moses, 2019; Champod et. al. 2004 y Ashbaugh, 1999); es importante aclarar que el cálculo del LR ha sido utilizado no sólo en la genética, sino también en la dactiloscopía (Garrent et. al; 2020; Adamu, 2017; Haraksim, 2014; Alberink, et. al, 2014; Neumann et. al, 2007), por lo que es necesario el desarrollo de estudios poblacionales que permitan obtener valores de referencia que expliquen el fenómeno de una población desde sus contextos evolutivos específicos (Rivaldería et. al; 2017).

Centrando la atención ahora en el tema de interés que es la Dactiloscopía, con fines de comprender la importancia del análisis de bases de datos de biométricos dactilares y del uso de herramientas estadísticas en un análisis dactiloscópico retomaremos el valor poblacional a partir de un ejemplo. Supongamos que ocurre un hecho delictivo en una celebración con 20 personas, donde una huella latente es el único indicio encontrado, el o la experta tomaría las impresiones de todos los asistentes y realizaría las confrontas correspondientes, en éste sentido, al tener una población limitada resulta sencillo estimar la probabilidad de que la huella encontrada sea de uno de los o las asistentes a partir de criterios de discriminación cómo: el porcentaje de individuos que comparten el tipo fundamental observado y los tipos de minucias en el sector del dactilograma equivalente a la huella latente; en contraste, pensemos que en lugar de ser una celebración fue un hecho ocurrido en la Ciudad de México con aproximadamente 9 millones de habitantes (INEGI, 2021), donde además se sabe que cerca de 1.2 millones son personas extranjeras residentes (SRD, 2022), en éste caso la población dada supera en cantidad a la del ejemplo planteado, no sería práctico en tiempo y en recursos comparar de forma manual la huella latente con los 9 millones de habitantes, el paso siguiente sería introducir la huella a un sistema biométrico de búsqueda y comparación automatizado cómo lo es el AFIS, sin embargo, como sucedió en el caso de Brandon Mayfield, pueden existir errores en la identificación, situación que refleja la necesidad de emitir conclusiones cuantificando la fuerza de las mismas (Champod et. al. 2004) y reconocer la tasa de error asociada al análisis dactiloscópico (Langenburg, 2012).

Siguiendo el planteamiento de ambos casos, el uso de herramientas estadísticas para el desarrollo de modelos de probabilidad permitiría conocer las frecuencias de características dactilares observadas en una muestra representativa, a fin de inferir el comportamiento dermatoglífico general de una población a partir de la extrapolación controlada y responsable de los resultados; es decir, no es necesario analizar las huellas de las 7,800 millones de personas del mundo, basta con que cada país realice estudios poblacionales para obtener parámetros propios de sus habitantes y así dotar a los y las expertas de argumentos objetivos con los cuáles apoyar sus conclusiones y a su vez robustecer los principios de diversidad y unicidad de las huellas dactilares.

Es importante aclarar que con la introducción de herramientas estadísticas a los análisis dactiloscópicos no se busca atribuir a una individualización un valor numérico (Stoney, 2001), ya que un modelo no puede hacer más que proporcionar una probabilidad, sino lo que se pretende es que el o la experta tenga parámetros sólidos y científicos para tomar decisiones que desencadenen en conclusiones objetivas (Stoney, 2001), tanto para elevar el escrutinio de la evidencia de las huellas dactilares como para proteger la transparencia en la praxis dactiloscópica, aunado a que de ésta manera se atenderían las recomendaciones relacionadas a la incorporación de sustento estadístico en el área (PCAST, 2016; AAAS, 2017, Aitken, 2021).

Cómo se desarrolló a lo largo del marco teórico, diversas instituciones y organizaciones han establecido recomendaciones para el desarrollo de modelos estadísticos válidos (PCAST, 2016; AAAS, 2017; Polski et. al, 2010) que en medida de lo posible sean incorporados dentro de las fases del método ACE-V (García-Cuevas, 2019; Koehler, 2008), y aunque actualmente no se reconozca oficialmente un modelo de probabilidad en el ámbito pericial, se han realizado aportes internacionales (Neumann et. al. 2015; Abraham et. al. 2013; Rivaldería, 2017 y nacionales (García-Cuevas, 2019) en trabajos enfocados al cálculo del LR para la inferencia de sexo, sin embargo, ninguno de los trabajos citados especifica cómo sus aportes se aplicarían a contextos forenses reales, donde se tenga un fragmento en lugar de una huella rodada o de apoyo, o bien en el análisis de bases de datos para fines de identificación de personas desaparecidas.

En el marco de los estudios poblacionales, se tienen datos de referencia sobre las características dermatoglíficas de población mexicana, referente a la frecuencia de tipo fundamental existen los antecedentes de Serrano (1969, 1982), García-Cuevas (2017) y Muñoz, ML (2018), mientras que para la variabilidad de minucias se cuenta con el trabajo de García-Cuevas (2017). La investigación desarrollada en la presente tesis aporta datos complementarios sobre la variabilidad del tipo fundamental, lo que permite tener un panorama más completo sobre la frecuencia de aparición de los patrones utilizados actualmente dentro del Sistema de clasificación de Vucetich en los Servicios Periciales de nuestro país, de igual manera es el segundo trabajo que proporciona datos referentes a las

frecuencias de aparición de minucias en población mexicana y el primero en hacerlo a partir de biométricos dactilares de apoyo.

Antes de continuar, es importante aclarar ciertos puntos que tienen que ser considerados para la interpretación de resultados con otros estudios, el primero de ellos es que la muestra analizada en la presente tesis corresponde a huellas de apoyo (biométricos) de los dedos pulgares de ambas manos de 300 individuos, mientras que en otros trabajos se han analizado huellas rodadas (impresiones físicas) de los 10 dedos de ambas manos de un muestreo con un rango de 200 a 300 individuos, por lo que, con fines de realizar una comparación responsable, sólo se tomarán aquellos datos correspondientes a los dedos pulgares, ya que, como producto de los resultados de dichas investigaciones se han encontrado asociaciones significativas entre el tipo fundamental y los diferentes dedos de la mano (Serrano, 1969, 1982; García-Cuevas, 2017; Muñoz, 2018). El segundo punto es respecto a la variabilidad de minucias, para población mexicana el único trabajo al respecto es el de García-Cuevas en 2017, y para otras poblaciones como la española se tiene el antecedente de Gutiérrez Redomero en 2008 y 2011, cabe aclarar que existen más investigaciones en otras poblaciones, sin embargo, la variabilidad de minucias se aborda desde la densidad de crestas, y dado que para el cálculo de la densidad es recomendable tener como muestra elementos dactilares completos, es decir, huellas rodadas, no se aplicó dicha metodología en la presente investigación. El tercer punto es respecto a la manera en la que son reportados los resultados en las diferentes publicaciones, es decir, cómo se mencionó en el Marco teórico, existen diferentes sistemas de clasificación de tipos fundamentales y de minucias, cuyo uso depende de cada país o del tipo de investigación por lo que no existe un consenso para el reporte de resultados, situación que apremia la realización de ajustes para la correspondencia entre sistemas, un ejemplo de ello es la denominación y concepción de las Presillas en el Sistema Inglés, dónde para la identificación de éste tipo fundamental se toma como referencia la anatomía de la mano (Moses, 2019).

Lo que respecta a la **frecuencia presentada por los tipos fundamentales** en la muestra estudiada, se observó que de manera global el patrón morfológico con mayor presencia es el Verticilo, seguido de la Presilla Externa, Presilla Interna y Arco, ésta distribución coincide

con la descrita en el trabajo de Muñoz (2018), García-Cuevas (2017) y Serrano (1969, 1982), cómo puede observarse, el tipo fundamental con mayor frecuencia fue el Verticilo, situación que presenta diferencias respecto a poblaciones de España (Gutiérrez-Redomero et. al (2008; 2011; 2013) y Argentina (Rivaldería et. al, 2017), donde la Presilla Externa muestra una mayor frecuencia en población española; los Verticilos y Presilla Externa tiene un comportamiento similar en población argentina.

Respecto a la simetría del pulgar se observó que existe una diferencia en la frecuencia de las Presillas, de tal forma que el Pulgar derecho tiene una prevalencia mayor de Presillas externas y el Pulgar Izquierdo de Presillas internas, datos que coinciden con los presentados por Muñoz (2018) para población mexicana, quien emplea en su investigación el Sistema Vucetich (Vucetich, 1904), este hallazgo es importante para teorías biológicas como la homología o simetría bilateral, la cuál estudia la relación de correspondencia en los seres vivos, de tal manera que una parte del cuerpo se relaciona con la colateral (Holló, 2015), es decir, el individuo que tuvo en su Pulgar Izquierdo una Presilla Interna es el mismo individuo que tuvo en el Pulgar Derecho una Presilla Externa.

Un hallazgo relevante de la presente investigación radica en la comparación de los resultados expuestos en el párrafo anterior con los reportados para población mexicana por García-Cuevas (2017). Para explicar éste punto retomaremos que existen diferencias de conceptualización de los tipos de patrón dactilar entre los sistemas de clasificación, los que abordaremos para fines de ésta comparación es el Sistema Vucetich empleado en el presente estudio y el Sistema Inglés que clasifica a las Presillas respecto a la posición anatómica de los huesos Ulnar y Radial del brazo, es decir, una Presilla Ulnar es aquella cuya orientación del flujo de las crestas se encuentra inclinada hacia la ulna o al dedo meñique de la mano y una Presilla Radial presenta la inclinación del flujo de crestas hacia el radio o al dedo pulgar (Moses, 2019); mientras que el Sistema Vucetich parte de la posición en la que se encuentra el delta, es decir, Presilla interna será aquella cuyo flujo general de crestas nazca del lado izquierdo haciendo su trayectoria a la derecha del dactilograma y presente un solo delta situado a la derecha del dactiloscopista, por el contrario, en la Presilla externa el flujo general nacerá del lado derecho haciendo su trayectoria a la izquierda del dactilograma y presentando

un solo delta situado a la izquierda del dactiloscopista (Trujillo, 2017). Como puede entenderse, una clara diferencia es que el Sistema Inglés utiliza como referencia el núcleo y la posición anatómica de la mano (considerando si es derecha o izquierda) mientras que el Sistema Vucetich realiza su clasificación a partir del delta y del nacimiento de las crestas. Ésta información es relevante para poder realizar una comparación respecto a las frecuencias de aparición de las Presillas con los reportados por García-Cuevas (2017) y los de la presente investigación, por lo que fue necesario realizar la clasificación de éste tipo fundamental a partir de su equivalencia con el Sistema Inglés, de tal manera que se tomó en cuenta el dedo del que provenía el biométrico y la posición anatómica (supinación) de la mano, resultando que para el Pulgar derecho la Presilla Radial corresponde a una Interna y la Presilla Ulnar a Externa, mientras que para el Pulgar izquierdo la Presilla Radial corresponde a una Externa y la Presilla Ulnar a Interna. De esta manera el 96% (264 dactilogramas) de las presillas de la muestra corresponden con la Ulnar y un 4% (11 dactilogramas) con la Radial, ésta proporción es coincidente entre ambas investigaciones (datos reportados para la población de la Ciudad de México) una vez realizada la equivalencia entre sistemas de clasificación.

Un punto a destacar es que el desarrollo de investigaciones poblacionales con un enfoque forense debe ser pensado siempre como una vía de aplicación directa al área, es decir, los parámetros poblacionales deben ser útiles bajo el contexto científico y técnico del país; y bajo las condiciones de contextos forenses reales, además de que se debe trabajar internacionalmente bajo criterios de clasificación equiparables entre sí que favorezcan la comparación rápida y sencilla entre sistemas. Ante ésta situación, Moses (2019) sugiere que, para la descripción de Presillas debe considerarse el hecho de que, en el caso de huellas latentes, no es posible determinar si el dedo del que proviene corresponde a la mano derecha o izquierda, por lo que una opción para la identificación del tipo de patrón dactilar Presilla sería describir hacia qué dirección se inclina el flujo general de las crestas (izquierda o derecha), de ésta manera la atención ya no se centraría en la posición anatómica de los huesos Ulnar y Radial, ya que éste factor es el determinante para la clasificación del tipo fundamental y por ende es necesario conocer de qué mano proviene la impresión (izquierda o derecha), información poco frecuente en un contexto forense.

Derivado de la variedad de etnias y la afluencia de extranjeros residentes en el país, México tiene una gran distribución de diversidad genética con características demográficas e histórico-culturales divergentes (INEGI, 2020). Al respecto, se han realizado investigaciones enfocadas al campo de la dermatoglifia en diferentes estados y grupos étnicos de la república (Ferré D'Amare y Stephens, 1974; Serrano, 1973, 1975, 1979 y 1980; Leche, 1933; Cummins, 1936), donde los resultados son reportados en frecuencias relativas globales, es decir, no hay una especificación de qué dedos fueron analizados o bien, la muestra está conformada por población de un mismo sexo (existiendo una mayor proporción de estudio del masculino que del femenino), por lo que no se puede hacer una comparación directa con los datos obtenidos en la presente investigación, sin embargo, en las publicaciones citadas se han encontrado diferencias significativas respecto a las frecuencias de sus tipos fundamentales, lo que demuestra la importancia de realizar estudios contemporáneos para obtener parámetros dermatoglíficos completos y actuales de población mexicana, de tal manera que los modelos probabilísticos que se desarrollen contemplen las diferencias inter e intrapoblacionales.

Los trabajos citados a lo largo de esta tesis respecto al tipo fundamental como los de García-Cuevas (2017), Muñoz (2018), Gutiérrez-Redomero et al. (2008, 2011, 2012, 2013, 2014), Stoney (2001), Rivaldería (2017), Hussein y Abdullah (2006), entre otros, siguen la tendencia de clasificar los patrones generales de las huellas en cuatro: Verticilo, Arco, Presilla Interna y Externa, sin embargo, se sabe que existen variaciones de cada uno (subtipos), aunque éstos se presenten con una menor prevalencia en la población en el mundo (Moses, 2019); partiendo de que la información que proporciona el nivel uno de detalle (tipo fundamental) permite realizar una exclusión rápida de posibles candidatos y que algunos patrones han mostrado asociaciones significativas con dedos específicos de la mano (por ejemplo, el verticilo con los pulgares), resulta indispensable considerar e iniciar a reportar dentro de las investigaciones las frecuencias de tipos fundamentales poco comunes, lo que proporcionaría datos cuantitativos (específicos de cada población) para el desarrollo de modelos probabilísticos robustos y eficientes, que pudieran permear directamente en los dictámenes dactiloscópicos al reportar de forma objetiva que cuando más infrecuente sea un tipo

fundamental, más discriminatorio es, y por tanto, una mayor fuerza probatoria tendrá el resultado de la identificación (Baryah y Krishan, 2020).

En lo que refiere a la frecuencia presentada por los **tipos de minucias** en la muestra estudiada fueron analizadas a partir de tres variables de estudio, el sector anatómico dactilar, el tipo fundamental y el sexo. Se observó que al dividir el biométrico por sectores la zona central del dactilograma concentra la mayor frecuencia de minucias en comparación con la zona periférica, cómo acotación debe tenerse presente que el motivo del marcaje de la circunferencia es estandarizar el tamaño de la huella dactilar y que como producto de la aplicación de la metodología a impresiones biométricas de apoyo se obtuvo que dicha circunferencia no siempre corresponde con el sistema crestal nuclear, aunado a que en la mayoría de las huellas la circunferencia abarcaba parcial o totalmente el ancho del dactilograma ocupando en espacio la mayor parte de él; se realiza ésta puntualización porque las frecuencias respecto a la zona central y periférica obtenidas en la presente tesis difieren de los registros de García-Cuevas (2017) para población mexicana y de Gutiérrez-Redo mero et al. (2008, 2011) y Rivaldería (2017) para población española y argentina respectivamente, al presentar mayor prevalencia de minucias en la zona periférica que central, sin embargo, las impresiones analizadas en los estudios mencionados son rodadas o completas, las cuales tienen un mayor contexto de los sistemas crestales marginal y basilar (correspondientes en este tipo de impresión a los subcuadrantes de la periferia) que una impresión de apoyo.

Tanto para la zona central como para la periférica se obtuvieron frecuencias generales, donde las Cortadas y las Bifurcaciones fueron los puntos característicos con mayor prevalencia, encontrando que las primeras presentan una frecuencia más alta en la zona periférica contrario a las segundas, cuya prevalencia es la zona central. Para poder comparar la variabilidad de minucias con datos de referencia en población mexicana, se recurrió a las tablas de frecuencias relativas de la investigación de García-Cuevas (2017) específicamente de los dedos pulgares, donde se encontró coincidencias en el comportamiento de los siguientes tipos de minucias: para la zona central Bifurcación, Encierro, Secante, Empalme, “M” y Punto Intracrestal, mientras que, para la zona de la periferia Cortada, Islote, Transversal, Cuña y Desviación. Este comportamiento no puede ser comparado con otras

poblaciones porque en los resultados de los artículos publicados se añaden las frecuencias relativas encontradas en la totalidad de los dedos de la mano, lo que no pueden ser cotejados de manera directa, aunado a que metodológicamente se han establecido diferentes tipos de minucias para identificación, un claro ejemplo son los trabajos de Gutiérrez-Redomero et al. (2008, 2011, 2012, 2013, 2014), donde minucias como la Bifurcación son divididas en Bifurcación y Convergencia, el Encierro en Ojal pequeño y Ojal grande y la Cortada en inicial y final, por mencionar algunas, pese a ésta situación, los hallazgos encontrados en ésta tesis respecto a las Bifurcaciones y Cortadas han sido una constante en todos los dedos de la mano para población mexicana (García-Cuevas, 2017) y en diversas poblaciones del mundo (Gutiérrez-Redomero et. al. 2011, Rivaldería; 2017, Champod, 1996; Okajima, 1970), lo que nos hace pensar en un posible patrón universal, situación que refuerza estadísticamente su continuo uso en los sistemas de clasificación de minucias (Galton, 1892; Prabhakar, 2000) y en sistemas de reconocimiento automatizado como el AFIS.

De manera general, los tipos de minucias con mayor frecuencia fueron Cortada, Bifurcación, Punto Intercrestal, seguido de Encierro, Empalme, Islote, Interrupción, Desviación, Transversal, Cuña, Punto Intracrestal, Secante, "M", Vuelta y Trifurcación. Siguiendo la misma vertiente de la variabilidad de minucias, respecto al sector anatómico dactilar, los resultados expuestos en el apartado de ésta investigación permitieron conocer que hay minucias que presentan asociaciones con subcuadrantes específicos del dactilograma, obteniendo relaciones destacables como Transversal con DIF, DID y DDD, "M" con DID y PDD, Interrupción con DID, DDF, DDD y PDF, Punto Intracrestal con DDF, Encierro con PDF, PDD y PID, Islote con PDF, PDD, PIF y PID, Vuelta con PDD y PID, Desviación y Cuña con PDF y PIF, Empalme con PDF, PDD y PID y Punto Intercrestal con PIF. De igual manera se obtuvo que los subcuadrantes con mayor variabilidad de tipos de minucias son el PDD y PDF. Las asociaciones descritas demuestran que es igual de relevante el análisis de la huella dividida por subcuadrantes como por zonas (central y periférica), ya que particularmente en un contexto forense real, no siempre se obtienen huellas latentes de tipo rodado o de apoyo, comúnmente se trabaja con fragmentos, por lo que caracterizar pequeñas áreas de una huella con mayor cantidad de información permite la obtención de datos cuantitativos sobre la prevalencia de tipos de minucias menos frecuentes, situación que aporta

información sustancial para el desarrollo de modelos probabilísticos que apoyen la toma de decisiones del o la experta respecto a la individualización, ya que, similar al tipo fundamental, cuando más infrecuente sea un tipo de minucia, mayor peso individualizador tiene, y por tanto, una mayor fuerza probatoria tendrá el resultado de la identificación.

La generación y estudio de parámetros dactilares de una población -cómo los descritos en la presente investigación- favorece el desarrollo de modelos de probabilidad. Las huellas de una población deben estar caracterizadas de manera robusta a fin de que en un futuro, se pueda emplear el cálculo de LR (Morrison, 2011; Neumann, 2007 y Martire, 2014) para el análisis de fragmentos cuyas relación comunique la probabilidad de que cierto fragmento de una huella dubitada pertenezca a un determinado sector del dactilograma de una huella indubitada, dada la presencia de ciertos tipos de minucias y con ello proporcionar un elemento objetivo para la confronta y la cuantificación de la fuerza de una conclusión (Villalobos, 2018).

En este sentido Kadafar (2019) menciona que las investigaciones deben orientarse hacia el desarrollo de parámetros objetivos para el análisis de cada tipo de evidencia, tomando en cuenta las fuentes que pueden afectar los resultados de tal manera que, por ejemplo, en el caso de métodos de comparación de características, se busque la homologación de criterios y metodologías precisas, objetivas y científicamente justificadas que conduzcan a resultados con límites de confianza establecidos y a conclusiones cada vez más sólidas.

Otra de las variables analizadas en la presente investigación fue la variabilidad del tipo de minucia respecto al tipo fundamental, se obtuvo que en común todos los tipos fundamentales presentaban asociaciones fuertes con un mínimo de seis tipos de minucias: Bifurcación, Cortada, Punto Intercrestal, Encierro, Empalme e Islote, y un máximo de nueve, incorporando a las mencionadas la Interrupción, Transversal y Desviación. Las asociaciones particulares fueron:

- Arco (6): Bifurcación, Cortada, Punto Intercrestal, Encierro, Empalme e Islote.

- Presilla Interna (7): Bifurcación, Cortada, Punto Intercrestal, Encierro, Empalme, Islote e Interrupción.
- Verticilo y Presilla Externa (9): Bifurcación, Cortada, Punto Intercrestal, Encierro, Empalme, Islote e Interrupción, Transversal y Desviación.

Se obtuvo que las asociaciones presentadas son estadísticamente significativas para cada tipo fundamental en función del número de frecuencias observadas en cada uno, por lo que cada una de ellas resulta relevante para la caracterización de los tipos fundamentales en población mexicana, siendo la Presilla Externa y el Verticilo las que mostraron una asociación mayor con la Transversal y la Desviación. Así mismo, se observó que el tipo fundamental con mayor variabilidad y frecuencia de tipos de minucias es el Verticilo, seguido de la Presilla Externa, Presilla Interna y Arco, correspondientes a los dedos pulgares, sin embargo, son coincidentes con el comportamiento general de la frecuencia relativa a todos los dedos de la mano en población mexicana de acuerdo a lo reportado por García-Cuevas (2017), y a los estudios realizados por Dankmeijer et. al (1980) para población holandesa, Okajima (1970) en la población japonesa y Gutiérrez-Redomero et. al (2011) para población española. Al separar por sexo los datos de los tipos fundamentales se obtuvo que minucias como Transversal y Desviación tienen mayor asociación con el Arco y la Presilla Interna para el sexo masculino, mientras que para el sexo femenino la minucia con mayor asociación es el Empalme. Las Presillas tuvieron un comportamiento especial con las Cortadas al presentar mayor asociación para hombres en Presilla Interna y para mujeres en Presilla Externa.

La última variable analizada para la caracterización de los tipos de minucias fue el sexo, donde se obtuvo que las minucias que mayor contribuyen a explicar la variabilidad de la muestra son: Bifurcación, Cortada, Punto Intercrestal, Encierro, Empalme, Islote, Interrupción, Transversal, Desviación y Cuña, mismas que no mostraron diferencias entre los patrones de agrupamiento entre sexos; en relación a los individuos, los del sexo masculino presentaron la formación de dos conglomerados como se presenta en el Gráfico 32 (situación ausente en el sexo femenino (ver el Gráfico 37), si bien este hallazgo es interesante ya que sugiere alguna característica particular compartida entre las huellas, no es alcance de la presente tesis explorar dicho comportamiento, no obstante, destaca como una oportunidad de

explorar en investigaciones futuras. En relación a las frecuencias relativas registradas para ambos sexos se observó que, de manera general el sexo masculino presenta mayor cantidad de minucias respecto al sexo femenino, situación que coincide con lo reportado para dedos pulgares por García-Cuevas (2017), y para todos los dedos de la mano por Gutiérrez-Redomero et. al. (2011) y Rivaldería (2017). De igual manera se encontraron diferencias estadísticamente significativas en Cortadas y Bifurcaciones, siendo las primeras más frecuentes en Mujeres y las segundas en Hombres, situación que discrepa entre los hallazgos de García-Cuevas (2017), dado que en su investigación encontró la relación inversa, a manera de hipótesis, se infiere que dicha diferencia puede deberse al tipo de impresión, ya que una huella de apoyo o plana tiene una menor cantidad de información en los subcuadrantes correspondientes a la periferia, generando un menor registro de minucias para esa zona. Para las minucias de menor frecuencia, también se obtuvieron diferencias significativas en Puntos Intercrestaes, Islotes, Interrupciones, Desviaciones y Transversales, siendo los Hombres los que mayor frecuencia de aparición registraron, éste patrón concuerda con el reportado para dedos pulgares por García-Cuevas (2017). Respecto a la comparación con otras poblaciones, no se puede hacer una confronta dado que las líneas de investigación relacionadas a las diferencias entre sexos han virado hacía la densidad de crestas, y metodológicamente, no se podrían equiparar resultados.

Una de las contribuciones más destacables de la presente investigación radica en la demostración estadísticamente significativa de los tipos de minucias que aportan información representativa para la caracterización de la variabilidad dermatoglífica para nuestra población. Históricamente se sabe de la existencia de diferentes sistemas de clasificación de minucias, mismos que pueden ser empleados y adaptados en función de las preferencias de cada país. Existe un común denominador en el uso -desde décadas atrás- de Cortadas y Bifurcaciones (Galton, 1892, Komarinski, 2005, INJ, 2011) los datos obtenidos en la presente investigación aportan un sustento estadístico sobre la justificación de su uso, sin embargo, también se hace la invitación a reflexionar sobre los tipos de minucias utilizados en un análisis dactiloscópico en México, ya que, como se evidenció en la variable de tipo fundamental y de sexo, en conjunto son mínimo seis y máximo diez los tipos de minucias que aportan información importante sobre la variabilidad dermatoglífica de la muestra. Sobre

éste mismo punto, se sabe que en México se consideran cinco tipos de minucias: Cortadas, Bifurcaciones, Islotes, Horquillas y Encierros (Vucetich, 1904); hay que precisar que las bifurcaciones y las horquillas tienden a evaluarse conjuntamente derivado de su similitud morfológica, por lo que con fines de este discurso se partirá de la identificación de cuatro minucias: Cortadas, Bifurcaciones, Islotes y Encierros, todos éstos tipos son considerados dentro de los seis más representativos (obtenidos en la presente investigación) para población mexicana, por lo que se propone replantearse el incremento del número y los tipos de minucias empleados en los estudios de identificación.

Derivado de los resultados obtenidos en la presente tesis, se ha probado que los biométricos dactilares de apoyo aportan información que permitió caracterizar una muestra de población mexicana, así mismo se han aportado parámetros dermatoglíficos correspondientes a la variabilidad de los tipos de minucias respecto a los subcuadrantes y zonas (central y periférica) de un dactilograma, al tipo fundamental y al sexo, demostrando así el potencial que tiene la perspectiva dactiloscopológica en los procesos de identificación humana, toda vez que la profundización del estudio de las crestas de los dedos de la mano favorezca el desarrollo científico y práctico (de Antón y Barberá, 2017) de protocolos de análisis cada vez más robustos que contemplen -a partir de herramientas estadísticas- elementos relevantes en el análisis de las huellas dactilares como los encontrados para población mexicana en la presente investigación, por ejemplo, el error humano a partir del cálculo del error intraobservador, las diferencias sexuales respecto a la frecuencia de minucias, la prevalencia de ciertos tipos de minucias en un sector o zona del dactilograma, las diferencias intra e interpoblacionales con poblaciones como la española y argentina, y la rareza de características dermatoglíficas como el tipo fundamental. Lo anterior a fin de impulsar el desarrollo de modelos probabilísticos que permitan sustentar las decisiones de los y las expertas, establecer objetivamente la validez de los resultados de los análisis y elevar el escrutinio cuando la evidencia son las huellas dactilares (PCAST, 2016, NIST, 2012 y Kadafar, 2019).

“La singularidad es casi invariablemente una pista”.

- Sherlock Holmes

Aplicación del “Protocolo de análisis de impresiones dactilares” y las bases de datos de biométricos dactilares

Uno de los objetivos específicos de la presente investigación fue aplicar el “Protocolo de análisis de impresiones dactilares” que se encuentra en desarrollo como parte de la línea de investigación en Lofoscopia en el Laboratorio de Antropología y Odontología Forense (LAOF) de la UNAM, dicho protocolo parte de la metodología propuesta por Gutiérrez-Redomero et. al. (2008) y fue aplicado por primera vez a una muestra de biométricos dactilares de apoyo con la finalidad de que, derivado de la puesta en práctica, se emitieran recomendaciones enfocadas al estudio de éste tipo de impresiones en contextos forenses.

El protocolo tiene una serie de pasos generales que consisten en el trazado del plano cartesiano y la circunferencia, el registro de datos correspondientes a los detalles de Nivel 1 y Nivel 2, y el análisis de resultados, respecto a éstos pasos generales se desarrollarán las siguientes recomendaciones:

1. *Trazado de la circunferencia:* Cómo se puntualizó a lo largo de la discusión y en el marco teórico, el tipo de impresión de apoyo consiste en la deposición del dedo sobre una superficie de tal manera que, en la mayoría de los casos, se imprime el sistema nuclear de la huella natural, sin embargo, no siempre se cumple dicho requisito y por ende, no se puede establecer una correlación estricta y directa de la circunferencia con el sistema crestal nuclear, situación que puede presentarse con una tendencia superior en las impresiones de tipo rodado, donde se tiene de extremo a extremo del dedo información sobre las minucias. Partiendo de ésta situación y considerando que en contextos forenses reales no siempre se cuenta con impresiones de la mejor calidad y con una extensa cantidad de información, se recomienda que tanto el trazado de la circunferencia como del eje parta del centro del núcleo del tipo fundamental cuando sea posible, y en los casos en los que no se pueda, detallar las características del dactilograma (sistema crestal coincidente en los subcuadrantes). Lo anterior con la finalidad de emitir resultados sobre el comportamiento de los tipos de minucias en la zona central y periférica del dactilograma que sea correspondiente con el sistema crestal nuclear; los sistemas marginal y basilar respectivamente.

2. *Detalles de Nivel 1:* Cómo se ha reiterado a lo largo de ésta tesis, las características dermatoglíficas menos frecuentes llevan consigo un potencial identificador derivado del principio de rareza, recordemos que una de las funciones del tipo fundamental es servir como una categoría de clase, es decir, acelera la búsqueda de una fuente de origen de la huella de tal manera que si se encuentra un patrón poco frecuente, se podrá realizar una exclusión de aquellas huellas que no correspondan al tipo fundamental de la huella problema (Jongh, 2019, Galton, 1982). Sin embargo, para poder aplicar parámetros específicos de una población es necesario que se contemplen dentro de las metodologías de análisis los sistemas de clasificación de tipos fundamentales y de minucias elegidos por el país de interés; siguiendo éstas premisas y considerando que en México se utiliza actualmente en los sistemas periciales el Sistema Vucetich, se recomienda que conjuntamente al registro del tipo fundamental, se permita incorporar -si es que se presenta- las características particulares del mismo, a fin de tener un panorama detallado sobre la existencia de diferencias en el flujo de las crestas entre un mismo tipo fundamental, y en consecuencia, obtener datos de referencia sobre la rareza de tipos fundamentales en nuestra población.
3. *Detalles de Nivel 2:* Los resultados de la presente tesis permiten realizar una aproximación estadística respecto a los tipos de minucias que por su frecuencia y las interacciones entre sí aportan información sustancial sobre las características de la muestra respecto a la división de un dactilograma, al tipo fundamental y al sexo de la persona. El protocolo plantea un total de 15 tipos de minucias, mismas que se identificaron -en mayor o menor frecuencia- en la muestra de la presente investigación, no obstante, un mínimo de 6 (Bifurcación, Cortada, Punto Intercrestal, Encierro, Empalme e Islote) y un máximo de 10 tipos (Interrupción, Transversal Desviación y Cuña) lograron la representatividad estadística en más de una variable (tipo fundamental y sexo). Por lo anterior, y con la finalidad de optimizar el análisis de impresiones dactilares sin pérdida de información sustancial se recomienda la reducción de tipos de minucias en el protocolo.
Siguiendo la discusión respecto a los detalles de Nivel 2, el protocolo realiza una serie de precisiones sobre los criterios de identificación de los tipos de minucias, situación

que facilita la toma de decisiones cuando se encuentran minucias que pudieran entrar en una doble categorización, sin embargo, durante la práctica existen arreglos específicos, donde discernir entre un tipo y otro pudiera significar la pérdida de información o un factor de error en la medición, de igual manera se identificaron tipos de minucias que por su morfología presentan similitudes que pueden complicar su identificación, por ejemplo: el Punto con el Islote, el Islote con la Cortada, la Bifurcación con el Empalme y la Cuña con la Interrupción. Por lo anterior, se recomienda la inclusión de más precisiones respecto a la longitud y morfología; y un diagrama de toma de decisiones que contemple las minucias anteriormente mencionadas. Además, derivado de los hallazgos en el presente estudio respecto a las combinaciones de minucias se propone el desarrollo de investigaciones que tengan como objetivo analizar el impacto estadístico de la identificación errónea de los tipos de minucias cuya morfología en casos reales tiende a ser similar, a fin de explorar si existe un impacto en la caracterización muestral, es decir, que tanto impacta la observación de una minucia u otra, para que de esta manera se puedan acotar criterios de identificación que sean claros y concisos aplicables a contextos reales.

Finalmente, como parte del análisis de nivel 2, se observó que existen minucias donde la estructura de una forma parte de otra, a lo que denominaremos “minucia combinada”, como parte de las recomendaciones, se plantea realizar una descripción detallada sobre la definición de cada tipo de minucia o bien, evaluar el impacto estadístico que tendría el registro de uno u otro o ambos tipos en la descripción muestral.

4. Análisis de datos: El protocolo establece una serie de *bullets* de las relaciones que deben ser estudiadas, sin embargo, como recomendación orientativa podría colocarse una sugerencia de pruebas estadísticas aplicables al protocolo, ya que por la naturaleza frecuencial de los datos, no cualquier estadístico es aplicable y si lo vemos desde una perspectiva pericial, sería oportuno contar con una “batería” de pruebas base que facilite la interpretación de las variables puntualizadas.

Respecto al análisis de bases de datos de biométricos dactilares, tanto en el planteamiento del problema como en el marco teórico quedó claro que dentro del contexto de la biometría

en México, se ha utilizado a las huellas dactilares con fines de seguridad nacional, seguridad privada, comercio electrónico, acceso a dispositivos digitales (INTAIPD, 2018), documentos de identificación oficial, entre otros, como consecuencia, instituciones como el INE, SAT, IMSS e ISSSTE, Universidades y Bancos, cuentan con una gran cantidad de bases de datos al ser creadas para fines propios y específicos de cada institución por lo que, los lineamientos de recopilación, sistematización, almacenamiento, intercambio y resguardo de información dependen de cada una (García, 2020).

En éste momento es preciso retomar que la recopilación de biométricos dactilares es importante tanto para el intercambio interinstitucional como para el contraste de una gran cantidad de datos dermatoglíficos entre países, es decir, los lineamientos que se establezcan para la recopilación de huellas -en ámbitos como el académico y el institucional- deben tender hacia la homologación de criterios y el cuidado de aspectos como la dirección en qué se gira el dedo, la técnica de captura, el tipo de impresión (rodada o plana) (Gutiérrez-Redomero, 2014), entre otros. Los resultados estadísticos de la presente tesis son un parteaguas para futuras investigaciones respecto a la caracterización de biométricos dactilares de apoyo al demostrar que sí permiten conocer y comparar de forma sustancial y prudente la variabilidad de patrones de tipos fundamentales y de tipos de minucias con los parámetros -para dedos pulgares- reportados por García-Cuevas (2017) para población mexicana, lo que demuestra que a partir del análisis de bases de datos de biométricos dactilares se puede obtener información relevante en la generación de parámetros que al utilizarse para el desarrollo de modelos estadístico impacten los procesos de identificación.

El análisis de bases de datos de biométricos dactilares y en general cualquier análisis con fines forenses, implica la obtención de información sensible en términos de identidad de una persona (Narayan-Mohanty, 2021), sin embargo, no debe verse como una violación a la privacidad o como un atentado a los derechos humanos, al contrario, deben de reunirse esfuerzos por establecer condiciones que aseguren ante todo la protección de datos personales de la población. El éxito que ha tenido la genética es el resultado de estudios que permiten conocer la frecuencia y el porcentaje de aparición de características del DNA para reportar en términos de probabilidad sus resultados (Villalobos, 2018), sin embargo, a pesar de que

también se obtiene información personal sensible, a la par de la toma biológica se considera el análisis de la misma como un todo derivado de la disociación de información que asocia la muestra directamente con la persona donante, lo que asegura en mayor medida el derecho a la protección de datos personales. Es tiempo de que la Dactiloscopia trabaje por el escrutinio científico solicitado (PCAST, 2016; AAAS, 2017; Polski et. al. 2011, EFPWG, 2011), a partir del desarrollo de metodologías basadas en evidencia (Quinto Sánchez, López-Escobedo y Loyzance, 2017) robustecidas de nuevas perspectivas como la antropológica y la dactiloscopológica, que a su vez contemplen los diferentes recursos que se tienen en la actualidad en el contexto mexicano, como lo son los biométricos dactilares de apoyo, las bases de datos y las herramientas estadísticas que sin duda han sido de gran utilidad en investigaciones de corte poblacional.

En este sentido, generar ciencia forense basada en evidencia requiere la visibilización y el reconocimiento de sus fragilidades para el fortalecimiento de sus metodologías, no puede ni debe de ignorarse el escrutinio científico que requieren los procesos de identificación, por ende, debe de dotarse a las ciencias y disciplinas forenses de herramientas que amparen e impulsen su impacto en la identificación humana.

*“Nada en el mundo debe ser temido, solo entendido.
Ahora es el momento de comprender más para que podamos temer menos”.*
-Marie Curie

CONCLUSIONES

1. El cálculo del error intraobservador debe ser incluido como parte del análisis dactiloscópico a partir de su incorporación periódica y sistemática en la fase de Evaluación de la metodología ACE-V y de la integración de su resultado en los dictámenes forenses.
2. Debe reconocerse como parte natural del estudio dactiloscópico y de cualquier estudio de comparación de características, el factor del error humano, por lo que es imperativo el desarrollo de protocolos que evalúen y cuantifiquen el error intra e inter observador.
3. El uso de herramientas estadísticas como el Acuerdo Observado, el Índice Kappa y el Coeficiente de Rho Spearman es una propuesta sencilla y eficaz para el cálculo del error intraobservador.
4. Se logró caracterizar la variabilidad dermatoglífica en una muestra de biométricos de apoyo a partir de la frecuencia de tipo fundamental y los tipos de minucias:
 - a) De acuerdo al Sistema Vucetich, el patrón morfológico con mayor presencia es el Verticilo, seguido de la Presilla externa, Presilla interna y Arco, esta distribución no mostró diferencias sexuales, pero sí en la simetría de los dedos, donde el Pulgar derecho tiene una mayor frecuencia de Presillas externas y el Pulgar izquierdo de Presillas internas, patrón que coincide con los datos reportados para población mexicana.
 - b) Hay mayor frecuencia de minucias en la zona central del dactilograma que en la periferia, puntualizando que la circunferencia marcada no siempre corresponde al sistema cresta nuclear.
 - c) El orden de mayor a menor de las frecuencias registradas para todos los tipos de minucias en ambos pulgares se observó de la siguiente manera: Cortada, Bifurcación, Punto Intercresta, Encierro, Empalme, Islote, Interrupción, Desviación, Transversal, Cuña, Punto Intracresta, Secante, "M", Vuelta y Trifurcación.
 - d) Las minucias que más frecuencia presentaron fueron la Cortada, Bifurcación y Punto Intercresta, en los subcuadrantes PDF y PIF para la primera, PDD

para la segunda y PDD y PID para la tercera. Como puede observarse, las minucias Bifurcación y Punto Intercrestal tienen mayor presencia en la zona central, mientras que la cortada tiene mayor presencia en la zona periférica

- e) Las minucias Encierro, Empalme, Islote, Interrupción, Desviación, Transversal, Cuña, Punto Intracrestal, Secante, “M”, Vuelta y Trifurcación son las que menor frecuencia presentaron, no obstante, mostraron un comportamiento específico, siendo para la zona central, el Encierro, Secante, Empalme, “M” y Punto Intracrestal las de mayor frecuencia, mientras que para la zona de la periferia fueron el Islote, Transversal, Cuña y Desviación; patrón que coincide con los datos reportados para población mexicana.
- f) Combinaciones de minucias que no mostraron diferencias entre sus frecuencias como Islote vs Punto Intercrestal, podrían interpretarse como la existencia de cierta relación estructural, por lo que se recomienda explorar en futuras investigaciones la relación que pudiera existir entre estos tipos de minucias para fines de robustecer los criterios de identificación.
- g) Los tipos de minucias menos frecuentes mostraron una asociación significativa en algunos subcuadrantes, observándose de la siguiente manera: Transversal con DIF, DID y DDD, “M” con DID y PDD, Interrupción con DID, DDF, DDD y PDF, Punto Intracrestal con DDF, Encierro con PDF, PDD y PID, Islote con PDF, PDD, PIF y PID, Vuelta con PDD y PID, Desviación y Cuña con PDF y PIF, Empalme con PDF, PDD y PID y Punto Intercrestal con PIF. El subcuadrante con mayor variabilidad de tipos de minucias es el PDF seguido del PDD. Esta información es relevante para la obtención de datos de referencia sobre el comportamiento de las minucias menos frecuentes, mismos que pueden ser utilizados en futuros estudios para el cálculo de probabilidades de aparición de una minucia específicamente en un subcuadrante.
- h) Las minucias Transversal y Desviación tienen mayor asociación con los tipos fundamentales Arco y Presilla Interna para el sexo masculino, mientras que para el sexo femenino la minucia con mayor asociación es el Empalme en el tipo fundamental Arco. La Cortada presenta mayor asociación con Presilla

interna para el sexo masculino, y con la Presilla externa para el sexo femenino.

- i) Los tipos fundamentales que presentan mayor variabilidad de tipos de minucias son Verticilo y Presilla externa, seguido de Presilla interna y Arco, patrón que coincide con el reportado para todos los dedos de la mano en población mexicana, además se obtuvieron asociaciones entre las minucias presentes en cada uno de los tipos fundamentales.
 - j) Existen diferencias estadísticamente significativas en la distribución de frecuencias relativas presentada por los diferentes tipos de minucias entre sexos, siendo el sexo masculino el que más minucias presenta, situación coincidente con lo reportado para pulgares en población mexicana y para todos los dedos en población española y argentina.
 - k) Se demostró estadísticamente en todas las relaciones analizadas (sector anatómico dactilar, tipo fundamental, y sexo) que, en conjunto, las minucias que explican la variabilidad de una muestra de población mexicana son un mínimo de seis (Bifurcación, Cortada, Punto Intercrestal, Encierro, Empalme, e Islote) y un máximo de 10 tipos, añadiendo al listado anterior la Interrupción, Transversal, Desviación y Cuña, este hallazgo expone una propuesta para ampliar y replantear el número y el tipo de minucias utilizadas en la praxis dactiloscópica de México.
5. Para generar un registro completo de la variabilidad dermatoglífica, es necesario considerar dentro de los datos almacenados, la frecuencia de aparición de aquellas características poco frecuentes que describan la rareza, por ejemplo, el tipo fundamental y los tipos de minucias de una población a fin de aportar datos para el desarrollo de modelos probabilísticos robustos y eficientes.
 6. La aplicación del “Protocolo de análisis de impresiones dactilares” del LAOF, para su aplicación en biométricos dactilares de apoyo, permitió realizar recomendaciones para su aplicación en impresiones de este tipo.
 7. Se demostró que los biométricos dactilares de apoyo sí permiten conocer y comparar de forma sustancial y prudente la variabilidad de patrones de tipos fundamentales y de tipos de minucias con los parámetros -para dedos pulgares- reportados para

población mexicana, española y argentina. Esta disposición deja de antepuesto la continua necesidad de desarrollar investigaciones para la caracterización dermatoglífica de diversas poblaciones en el mundo, a fin de generar y concentrar información sobre las descripciones de biométricos (frecuencias), siempre y cuando se disocie la información personal para el estudio.

8. Se deja de manifiesto la incipiente necesidad de que los protocolos de análisis de huellas dactilares tengan dentro de sus pasos críticos el uso de herramientas estadísticas que fortalezcan el alcance de los resultados, tanto para la identificación de personas, como para el desarrollo de áreas como la dactiloscopología.
9. Se aportaron datos relevantes sobre las características dermatoglíficas de una muestra de población mexicana contemporánea, mismos que contribuyen a la formación y complementación de parámetros intra e inter poblacionales que pueden ser utilizados para el desarrollo de modelos probabilísticos aplicables a la identificación humana.

REFERENCIAS

- Abraham, J., Champod, C., Lennard, C. y Roux, C. (2013). Modern statistical models for forensic fingerprint examinations: A critical review. *Forensic Science International*, 232, 131-150.
- Abraira, V. (2001). El índice kappa. *SEMERGEN*, 27(5), 247-249.
- Adamu, L. H. y Taura, M. G. (2017). Application of likelihood ratio and posterior probability density in sex estimation from level two fingerprint features among Hausa ethnic group. *Egyptian Journal of Forensic Sciences*, 7(25). doi 10.1186/s41935-017-0026-6
- Ahmed, A. A y Osman, S. (2016). Topological variability and sex differences in fingerprint ridge density in a sample of the Sudanese population. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 42, 25-32.
- Aitken, C., Taroni, F. y Bozza, S. (2021). *Statistics and the Evaluation of Evidence for Forensic Scientists* (3ª Ed.). John Wiley & Sons Ltd.
- Alberink, I., de Jongh, A. y Rodriguez, C. (2014). Fingermark evidence evaluation based on automated fingerprint identification system matching scores: the effect of different types of conditioning on likelihood ratios. *Journal of Forensic Sciences*, 59(1), 70–81.
- Alcoceba, J. (2018). Los estándares de cientificidad como criterio de admisibilidad de la prueba científica. *Revista Brasileira de Direito Processual Penal*, 4, 215-242.
- Amat-Rodrigo, J. (Enero de 2016). Test Kruskal-Wallis. *RPubs*. https://rpubs.com/Joaquin_AR/219504?fbclid=IwAR0I2sTO6tdjGEjbjFWRHAulaly6pokfzDrYH8I1cdv6TEFM_XsF-TOWiQ
- Australian Criminal Intelligence Commission (ACIC) (2016). *Annual Report - CrimTrac*. Australia.
- Ali, F. I. y Ahmed, A. A. (2020). Sexual and topological variability in palmprint ridge density in a sample of Sudanese population. *Forensic Science International: Reports* 2. <http://doi.org/10.1016/j.fsir.2020.100151>
- Allen, G. (1968) Diagnostic efficiency of fingerprint and blood group differences in a series of twins. *Acta geneticae medicae et gemellologiae: twin research (Roma)*, 17(2), 359-374.
- Aguilar-Ruíz, M.O. (2007) Bases de datos criminalísticos. *Panorama internacional sobre justicia penal*. Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM. México.

- Ashbaugh, D. R. (1999). *Quantitative-Qualitative Friction Ridge Analysis: An Introduction to Basic and Advanced Ridgeology*. CRC Press.
- Barnes, J. (2011). History. En National Institute of Justice, *The Fingerprint Sourcebook*. Washington, D. C.: U.S. Department of Justice.
- Baryah, N. y Krishan, K. (2020). Exploration of digital dermatoglyphics of two ethnicities of North India-forensic and anthropological aspects. *Forensic Science International: Reports* 2. <https://doi.org/10.1016/j.fsir.2020.100055>
- Belludi, A. C., Sridhara, A., Kumar, N. C., Konde, S. y Noojadi, S. R. (2021). Dermatoglyphics: A Noninvasive Diagnostic Tool in Predicting Class III Skeletal Malocclusion in Children. *International Journal of Clinical Pediatric Dentistry*, 14(1), 63-69.
- Bernal, V., Gonzalez, P. N., Perez, S. I. y Del Papa, M. C. (2004). Evaluación del error intraobservador en bioarqueología. *Intersecciones en Antropología*, 5, 129-140.
- Bonnevie, K. (1924). Studies on papillary patterns of human fingers. *Journal of Genetics*, 15, 1-115.
- Campos, I. (19 de agosto de 2020). Datos biométricos ¿El fin de las contraseñas tradicionales?. Deloitte. <https://www2.deloitte.com/mx/es/pages/dnoticias/articulos/datos-biometricos-el-fin-de-las-contrasenas.html>
- Cáceres, R. (2017). El sistema de información e inteligencia Plataforma México. *URVIO Revista Latinoamericana de Estudios de Seguridad*, 21, 175-190.
- Champod C. (1995). Edmond Locard—Numerical standards and “probable” identifications. *J Forensic Ident* 45:136–163.
- Champod C, Margot P. A. (1996) Analysis of minutiae occurrences on fingerprints—the search for non-combined minutiae. En: *Proceedings of International Association of Forensic Sciences*. (IAFS), Tokyo, Japan.
- Champod, C., Lennard, C., Margot, P. y Stoilovic, M. (2004). *Fingerprints and other ridge skin impressions*. CRC Press.
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and psychological measurements*, 20(1), 37-46.
- Comisión Nacional de Búsqueda (CNB) (2020). *Protocolo Homologado de Búsqueda (PHB)*. México: Acuerdo SNBP/002/2020.
- Cummins, H. y Midlo, C. (1961). *Fingerprints, Palms and Soles. An Introduction to Dermatoglyphics*. New York: Dover Publication.

- Cummins, H. H. (1926). Epidermal ridge configurations in developmental defects, with particular references to the ontogenetic factors which condition ridge direction. *American Journal of Anatomy*, 38, 89–151.
- Cummins, H. S. (1936) Finger prints in Maya Indians. *Middle American Research Series*, 7, 229-23.
- Dankmeijer, J. (1980). Some anthropological data on finger prints. *American Journal of Physical Anthropology*, 23(4), 377-388.
- De la Puente-Viedma, C. (2018). *Estadística descriptiva e inferencial*, Madrid: Ediciones IDT.
- de Antón y Barberá F. (2017) Reminiscencias lofoscópicas, con especial alusión al correcto uso del lenguaje técnico. *Gaceta internacional de ciencias forenses*, 24, 34-64.
- Díaz-Monroy, L. G. (2012). *Estadística multivariada: Inferencias y métodos*. Universidad Nacional de Colombia.
- Díaz-Rodríguez, V. (2013). Sistemas biométricos en materia criminal: un estudio comparado. *Revista del Instituto de Ciencias Jurídicas de Puebla, México*, 7(31), 28-47.
- Dietrichson, A. (2019). *Métodos Cuantitativos*. Bookdown. <https://bookdown.org/dietrichson/metodos-cuantitativos/edici%C3%B3n.html#edici%C3%B3n>
- Dipierrri, J. E., Gutiérrez-Redomero, E., Rivaldería, N., Alonso-Rodríguez, M. C. y Alfaro, E. (2018). The asymmetry of dermatoglyphic finger ridge counts and the geographic altitude of the Jujenean population in northwest Argentina. *HOMO - Journal of Comparative Human Biology*, 69, 364-376.
- Dror, I., Champod, C., Langerburg, G., Charlton, D., Hunt, H., Rosenthal, R. (2011). Cognitive issues in fingerprint analysis: inter- and intra-expert consistency and the effect of a 'target' comparison. *Forensic Science International*, 208(1-3), 10-17.
- Dror, I. E. y Charlton, D. (2006). Why Experts Make Errors. *Journal of Forensic Identification*, 56(4), 600-616.
- Dror, I. E., Charlton, D. y Perón, A. E. (2006). Contextual information renders experts vulnerable to making erroneous identifications. *Forensic Science International*, 156, 74-78.
- El-Abed. M. y Charrier, C. (2012). Evaluation of Biometric Systems. En J. Yang y S. J. Xie (Eds.), *New Trends and Developments in Biometrics*. IntechOpen.

- Eshak, G. A., Zaher, J.F., Hasan, E. I. y El-Azeem-Ewis, A.A. (2013). Sex identification from fingertip features in Egyptian population. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 20(1), 46-50.
- Expert Working Group (NIST) on Human Factors in Latent Print Analysis (2012). *Latent Print Examination and Human Factors: Improving the Practice through a Systems Approach*. U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, National Institute of Justice.
- Fernández, S, Córdoba, A y Cordero J., (2002) *Estadística descriptiva*. ESIC. (2ª Ed.). Madrid, España.
- Ferre-D'Amaré, R. y Stephens, J. C. (1974). Dermotoglifos de nahuas y huastecos. *Memorias de la II Reunión Anual de la Sociedad Mexicana de Genética*, 369-393.
- Fiscalía General de la República (FGR). (6 de septiembre de 2016). Establecen PGR, INE y CONATRIIB mecanismo conjunto para la identificación de personas desaparecidas. <https://www.gob.mx/fgr/es/articulos/establecen-pgr-ine-y-conatrib-mecanismo-conjunto-para-la-identificacion-de-personas-desaparecidas>
- Fiscalía General de la República (FGR) (2021). *Instructivo de huellas dactilares y de planta de los pies*. México: Agencia de Investigación Criminal: Coordinación General de Servicios Periciales-Alerta Ámber-, México.
- Fiumara, G., Tabassi, E., Flanagan, P., Grantham, J., Ko, K., Marshal, K., Schwarz, M., Woodgate, B. y Boehnen, B. (2018). *Nail to Nail Fingerprint Challenge*. U. S. Department of Commerce: National Institute of Standards and Technology.
- Fournier, N. A. y Ross, A. H. (2016). Sex, Ancestral, and pattern type variation of fingerprint minutiae: A forensic perspective on anthropological dermatoglyphics. *American Journal of Physical Anthropology*, 160(4), 625-632.
- Forthofer, R. N., Lee, E. S. y Hernandez, M. (2007). *Descriptive Methods*, en *Biostatistics* (pp. 21–69). Elsevier Academic Press.
- Francis, P. J. y Wills, B. J. (1999). *Introduction to Principal Components Analysis*. Quasars and cosmology. *ASP Conference Series*, 162, 363-372.
- Galton, F. (1892). *Fingerprints*. McMillan & Co.
- García-Cuevas, M. (2018). *Variabilidad de las impresiones dactilares en identificación forense. un estudio para su aplicación en la población mexicana*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México].
- García, D. (2020). *Privacidad e Identificación Forense de Personas Desaparecidas: Análisis jurídico sobre el intercambio de datos personales con fines de identificación humana*. Ciudad de México: Fortalecimiento del Estado de Derecho.

- García, Z. (2016). Los paradigmas jurídicos frente a la convergencia de otras ciencias en el quehacer judicial. *Boletín Mexicano de Derecho Comparado*, 145, 1.
- Garrett, B. L., Crozier, W. E. y Grady, R. (2020). Error Rates, Likelihood Ratios, and Jury Evaluation of Forensic Evidence. *Journal of Forensic Sciences*, 65(4), 1199-1209.
- Gianelli, P. C. (2006). Daubert Challenges to Fingerprints. *Faculty Publications (Case Western Reserve University)*, 155, 624-642.
- Gold, S. (2013). Understanding the digital fingerprint. *Network Security*, 12, 15–18.
- González, P. N., Bernal, V., Peres, S. I., Del Papa, M., Gordon, F. y Ghidini, G. (2004). El error de observación y su influencia en los análisis morfológicos de restos óseos humanos. Datos de variación discreta. *Revista Argentina de Antropología Biológica* 6(1), 35-46.
- González-Rodríguez, J.; Fierrez-Aguilar, J.; Ramos-Castro, D.; Ortega-García, J. Bayesian analysis of fingerprint, face and signature evidences with automatic biometric systems. *Forensic Sci. Int.* 2005, 155, 126–140.
- Grinenko, O., Li, J., Mosher, J. C., Wang, I. Z., Bulacio, J. C., Gonzalez-Martinez, J., Nair, D., Najm, I., Leahy, R. M., y Chauvel, P. (2018). A fingerprint of the epileptogenic zone in human epilepsies. *Brain: a journal of neurology*, 141(1), 117–131.
- Gutiérrez, E., Galera, V., Martínez, J. M. y Alonso, C. (2007). Biological variability of the minutiae in the fingerprints of a sample of the Spanish population. *Forensic Science International*, 172, 98-105.
- Gutiérrez-Redomero, E., Alonso, C., Romero, E., y Galera, V. (2008) Variability of fingerprint ridge density in a sample of Spanish Caucasians and its application to sex determination. *Forensic Science International*. 180(1), 17–22.
- Gutiérrez-Redomero, E., Alonso-Rodríguez, C., Hernández-Hurtado, L. E. y Rodríguez-Villalba, J. L. (2011). Distribution of the minutiae in the fingerprints of a sample of the Spanish population. *Forensic Science International*, 208. 79-90.
- Gutiérrez-Redomero, E., Quirós, J. A., Rivaldería, N. y Alonso, M. C. (2013). Topological Variability of Fingerprint Ridge Density in a Sub-Saharan Population Sample for Application in Personal Identification. *Journal of Forensic Sciences*, 58(3), 592-600.
- Gutiérrez-Redomero, E., Rivaldería, N., Alonso-Rodríguez, C., Martín, L. M., Dipierri, J. E., Fernández-Peire, M. A. y Morillo, R. (2012) Are there population differences in minutiae frequencies? A comparative study of two Argentinian population samples and one Spanish sample. *Forensic Science International*, 222(1–3), 266–276.

- Gutiérrez-Redomero, E., Rivaldería, N., Alonso-Rodríguez, M.C. y Sánchez-Andrés, A. (2014) Assessment of the methodology for estimating ridge density in fingerprints and its forensic application, *Science and Justice*, 54(3), 199–207.
- Haber, L. y Haber, R. N. (2004). Error Rates for Human Latent Fingerprint Examiners. En N. Ratha y R. Bolle (Eds.), *Automatic Fingerprint Recognition Systems* (pp. 339-360). Springer.
- Hamilton, I. (2013). Fingerprints. En *Encyclopedia of Forensic Sciences: Second Edition* (pp. 346–351). Elsevier Inc.
- Haraksim, R. (2014) Validation of likelihood ratio methods used in forensic evidence evaluation: Application in forensic fingerprints. [Tesis de doctorado, University of Twente, Enschede].
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C. y Baptista-Lucio, M. P. (2014). *Metodología de la Investigación* (6ª Ed.). México: McGraw-Hill.
- Hicklin, R. A., Ulery, B. T., Ausdemore, M., y Buscaglia, J. A. (2020). Why do latent fingerprint examiners differ in their conclusions? *Forensic Science International*, 316. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2020.110542>
- Holló, G. (2015). A new paradigm for animal symmetry. *Interface Focus*, 5. <http://dx.doi.org/10.1098/rsfs.2015.0032>
- Holt, S. (1968) The Genetics of Dermal Ridges. *Archives of internal medicine*, 123(1). doi:10.1001/archinte.1969.00300110113042
- Hussein, I. A. y Abdullah, N.F. (2006) Fingerprint Angles and Patterns in the Population of Najaf Province. *Ibn Al-Haitham Journal for Pure and Applied Science*, 19(4), 21-33.
- Hutchins, L. (2011). Systems of friction ridge classification. En National Institute of Justice, *The fingerprint sourcebook*. Washington, DC: U.S. Dept. of Justice.
- INEGI, I. (2020). Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). [online] [Inegi.gob.mx](http://inegi.gob.mx).
- Instituto Nacional de Justicia (INJ) (2011). *El libro de referencia de las huellas dactilares*. Washington, D.C.: Departamento de Justicia de los Estados Unidos.
- Instituto Nacional de Transparencia, Acceso a la Información y Protección de Datos Personales (INTAIPD) (2018). *Guía para el tratamiento de datos biométricos*. México.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) (2009) *Guía para la presentación de gráficos estadísticos*. Perú: Centro de Investigación y desarrollo.

- INEGI (2021). En la ciudad de México somos 9, 209, 944 habitantes: censo de población y vivienda 2020. Comunicado de Prensa. México.
- INTERPOL (2012). Directrices para la transmisión de huellas dactilares. Servicio de Identificación OIPC-INTERPOL.
- INTERPOL (2007). Bases de datos-Somali connection completes INTERPOL's I-24/7 communications network. <https://www.interpol.int/News-and-Events/News/2007/Somali-connection-completes-INTERPOL-s-I-24-7-communications-network>
- Ishak, N., Hemy, N. y Franklin, D. (2012). Estimation of sex from hand and handprint dimensions in a Western Australian population. *Forensic Science International*, 221. <http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2012.04.017>
- Jain, A., Ross, A. y Prabhakar, S. (2004). An Introduction to Biometric Recognition. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 14(1), 4-20.
- Jain, A. K., Flynn, P. y Ross, A. A. (Eds.) (2008). *Handbook of Biometrics*. Springer.
- James-Charlton, D. A. (2011). *An Industrial Revolution for Fingerprint Science? The Impact of Cognition and Human Factors on Fingerprint Examiners: Implications for the Use of Fingerprint Examiner Expertise and Administration within Law Enforcement*. [Tesis de doctorado, Bournemouth University].
- Jasso-Cuéllar, J., Gil-Chavarría, I. y Quinto-Sanchez, M. (2020). Anterior dental arch shape and human identification: Kieser et al. method applied to 2D-3D dental models in Mexican population. *Forensic Science International: Reports* 2. <http://doi.org/10.1016/j.fsir.2020.100161>
- Jolliffe, I. T. (1972). Discarding Variables in a Principal Component Analysis. I: Artificial Data. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 21(2), 160-173.
- Jongh, A., Lubach, A. R., Lie-Kwie, S.L. y Alberink I. (2019). Measuring the Rarity of Fingerprint Patterns in the Dutch Population Using an Extended Classification Set. *Journal of Forensic Sciences*, 64(1), 108-119.
- Kadafar, K. (2019). The need for objective measures in forensic evidence. *Significance*, 16, 16-29.
- Kallenberg, O. (2002). *Foundations of Modern Probability* (2ª Ed.). Springer Series in Statistics.
- Kamnikar, K. R., Plemons, A. M. y Hefner, J. T. (2017). Intraobserver Error in Macromorphoscopic Trait Data. *Journal of Forensic Sciences*. doi: 10.1111/1556-4029.13564

- Kapoor, N. y Badiye, A. (2014). Digital dermatoglyphics: A study on Muslim population from India. *Egyptian Journal of Forensic Sciences*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejfs.2014.08.001>
- Kapoor, N. y Badiye, A. (2015). Sex differences in the thumbprint ridge density in a central Indian population. *Egyptian Journal of Forensic Sciences*, 5, 23-29.
- Kapoor, N., Mishra, S. D. y Badiye, A. (2020). Single-digit fingerprint analysis for hand determination: A study of twinned loops. *Medicine, Science and the Law*. <https://doi.org/10.1177/0025802420910303>
- Karmakar, B., Yakovenko, K. y Kobylansky, E. (2006). Mode of inheritance of dermatoglyphic pattern intensity index on fingers in five Indian populations: a comparative study between individual trait and its factor. *American Journal of Human Biology*, 18(3), 377-386.
- Kassambara, A. (2017). *Practical Guide To Principal Component Methods in R. Multivariate Analysis II*. STHDA.
- Kaur, R. y Garg, R. K. (2011). Determination of gender differences from fingerprint ridge density in two northern Indian populations. *Problems of Forensic Sciences*, 85, 5–10.
- Kaye, D. H. (2010). Probability, Individualization, and Uniqueness in Forensic Science Evidence: Listening to the Academies. *Brooklyn Law Review*, 75(4), 1163-1185.
- Koehler, J. J. (2008). Fingerprint Error Rates and Proficiency Tests: What They are and Why They Matter. *Hastings Law Journal*, 59(5), 1077-1100.
- Komarinski, P., Higgins, P. T., Higgins, K. M. y Fox, L. K. (2005). *Automated Fingerprint Identification Systems (AFIS)*. Elsevier Academic Press.
- Konigsberg, L. W., Ross, A. H. y Jungers, W. L. (2006). Estimation and Evidence in Forensic Anthropology. En A. Schmitt, E. Cunha y J. Pinheiro (Eds.), *Forensic Anthropology and Medicine* (pp. 317-331). Springer.
- Labati, R. D., Piuri, V. y Scotti, F. (2016). *Touchless Fingerprint Biometrics*. CRC Press.
- Landis JR, Koch GG. (1977) The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33: 159-174.
- Langenburg, G., Champod, C. y Wertheim, P. (2009). Testing for potential contextual bias effects during the verification stage of the ACE-V methodology when conducting fingerprint comparisons. *Journal of Forensic Sciences*, 54(3), 571-582.

- Langley, N.R., & Tersigni-Tarrant, M.A. (Eds.). (2017). *Forensic Anthropology: A Comprehensive Introduction, Second Edition (2nd ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9781315300030>
- Langley, N. R., Meadows-Jantz, L., McNulty, S., Maijanen, H., Ousley, S. D. y Jantz, R. L. (2018). Data for validation of osteometric methods in forensic anthropology. *Data in Brief*, 19, 21-28.
- Leche-Stella, M. A. (1933) Dermatoglyphics and functional lateral dominance in Mexican Indians (Maya and Tarahumara). *Measures of men. Middle American Research Series*, 5, 29-42.
- Lee, H. C. y Gaensslen, R. E. (Eds.) (2001). *Advances in fingerprint technology (2ª Ed.)*. CRC Press.
- Loyola-González, O., Ferreira-Mehnert, E. F., Morales, A., Fierrez, J., Medina-Pérez, M. A. y Monroy, R. (2021). Impact of minutiae errors in latent fingerprint identification: Assessment and prediction. *Applied Sciences*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/app11094187>
- Loyzance-Valdés, C. C. (2017) Huellas dactilares. En E. L. Pérez-Campos, Z. García-Castillo, M. E. Bravo-Gómez y E. Pérez-Campos Mayoral, *Tópicos Selectos de Ciencia Forense y Seguridad*. (pp. 203-2010). México: Red Temática de Ciencia Forense, CONACYT.
- Maceo, A. V. (2011). Anatomy and physiology of adult friction ridge skin. En National Institute of Justice, *The fingerprint sourcebook*. Washington, DC: U.S. Dept. of Justice.
- Martire, K. A., Kemp, R. I., Sayle, M. y Newell, B. R. (2014) On the interpretation of likelihood ratios in forensic science evidence: Presentation formats and the weak evidence effect. *Forensic Science International*, 240, 61-68.
- Marusteri M, Bacarea V (2010). Comparing groups for statistical differences: how to choose the right statistical test? *Biochem Med*; 20:15-32.
- McHugh, M. L. (2012). Interrater reliability: the kappa statistic. *Biochemia Medica*, 22(3), 276-282.
- Meier, R. (1980). Anthropological Dermatoglyphics: A Review. *Yearbook of physical anthropology*, 23, 147-178.
- Mondragón, A. (2014). Uso De La Correlación De Spearman En Un Estudio De Intervención En Fisioterapia. *Movimiento Científico*, 8(1), 98-104.
- Monroy-Saldívar, S. (2008). *Estadística descriptiva (1ª Ed.)*. México: Instituto Politécnico Nacional.

- Montes AJ, Ruiz Vaquero R. (2004) Relación entre variables cuantitativas. Cuba:[CD].Informática Médica II. Editorial ECIME;, p.1-30.
- Morrison, G. S. (2011). Measuring the validity and reliability of forensic likelihood-ratio systems. *Science and Justice*, 51(3), 91-98.
- Moses, H. M. (2019). *Fundamentals of fingerprint analysis* (2ª Ed.). CRC Press.
- Movimiento por nuestros desaparecidos en México (MNDM) (2021). La crisis forense en México: Más de 52,000 personas fallecidas sin identificar. México.
- Muñoz-Almaguer, M. L., Bancalari-Organista, C., Hernández-Duarte, M. S., Virgen-Montelongo, M., Díaz-Burke, Y., Medina-Díaz, E. y González-Sandoval, C. E. (2018). Prevalencia del patrón dactilar en los dermatoglifos de estudiantes universitarios de Jalisco, México. *Gaceta Internacional de Ciencias Forenses*, 27, 51-62.
- Nagar, A., Choi, S. A. y Jain, A. K. (2012). Valor probatorio de la comparación automatizada de huellas dactilares latentes: un enfoque empírico. *Transacciones IEEE sobre análisis forense y seguridad de la información*, 7(6), 1752-1765.
- Narayan-Mohanty, M. y Sikka, R. (2021). Review on fingerprint-based identification system. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.414>
- Nayak, V. C., Rastogi, P. y Kanchan, T. (2010). Sex differences from fingerprint ridge density in Chinese and Malaysian population. *Forensic Science International*, 197, 67–69.
- Neumann, C., Champod, C., Puch-Solis, R., Egli, N., Anthonioz, A. y Bromage-Griffiths, A. (2007). Computation of Likelihood Ratios in Fingerprint Identification for Configurations of Any Number of Minutiae. *Journal of Forensic Sciences*, 52(1), 54-64.
- Neumann, C., Champod, C., Yoo, M. y Genessay, T. (2015). Quantifying the weight of fingerprint evidence through the spatial relationship, directions and types of minutiae observed on fingermarks. *Forensic Science International*, 248, 154-171.
- Norovsambuu, O., Tsend-Ayush, A., Lkhagvasuren, N., y Jav, S. (2021). Main characteristics of dermatoglyphics associated with schizophrenia and its clinical subtypes. *PLoS one*, 16(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252831>
- Okajima, M. (1970). Frequency of Forks in Epidermal-ridge Minutiae in the Finger Print. *American Journal of Physical Anthropology*, 32 (1), 41-48.
- Oktem, H., Kurkcuoglu, A., Pelin, I. C., Yazici, A. C., Aktaş, G. y Altunay, F. (2015). Sex differences in fingerprint ridge density in a Turkish young adult population: a sample of Baskent University. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 32, 34–38.

- Orts, A. P. (2000) Los sesgos en los formatos de investigación. Un mecanismo de control interno. *Enfermería en cardiología*, 21(22), 33-35.
- Pacheco, I., Cerchiai, B. y Stoiloff, S. (2014). Miami-Dade Research Study for the Reliability of the ACE-V Process: Accuracy & Precision in Latent Fingerprint Examinations. Miami-Dade Police Department (MDPD) Forensic Services Bureau (FSB)
- Pankanti, S., Prabhakar, S. y Jain, A. K. (2002). On the Individuality of Fingerprints. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(8), 1010-1025.
- Penrose, L. S. y O'Hara, P. T. (1973). The development of epidermal ridges. *Journal of Medical Genetics*, 10, 201–208.
- Pérez, I. (11 de mayo de 2020). Avances en la Identificación de personas mediante las huellas dactilares. <http://ciencia.unam.mx/leer/994/avances-en-la-identificacion-de-personas-mediante-las-huellas-dactilares>
- Pérez, S. I., González, P. N., Bernal, V., Del Papa, M. C., Barreiro, A., Negro, C. y Martínez, L. (2004). El error de observación y su influencia en los análisis morfológicos de restos óseos humanos. *Revista Argentina de Antropología Biológica*, 6(1), 61-75.
- Polski, J., Smith, R. y Garrett, R. (2010). The Report of the International Association for Identification, Standardization II Committee. National Institute of Justice.
- Prabhakar, S., Jain, A. K., Wang, J., Pankanti, S. y Bolle, R. (2000). Minutia verification and classification for fingerprint matching. *Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition. ICPR-2000*, 1, 25-29.
- President's Council of Advisors on Science and Technology (2016). PCAST Releases Report on Forensic Science in Criminal Courts. Washington, D.C.: White House Office of Science and Technology Policy.
- Quinto-Sanchez, M., García, S., Nares, A., Hernández, C., San Juan, C., Huitrón, S., Loyzance, C. y Gil-Chavarria, I. (2022). La estimación del error en métodos cuantitativos para identificación humana: un experimento con las arcadas dentales. *ReCiF* [Internet], 1(1), 1-22. <http://recif.unam.mx/revista/article/view/16?fbclid=IwAR3YSWm7jmf83n0N4Nfl5GeJq-JZ6F-DFE4mPr4s-tBkG38IXmi5XmA92c>
- Quinto-Sánchez, M., López-Escobedo, F. y Loyzance, C. (2018). Desarrollo de tecnología para la identificación humana. En Z. García-Castillo, F. López-Escobedo y L. Goslinga-Remírez, *Temas de vanguardia en Ciencia Forense*. México: Red Temática de Ciencias Forenses, CONACYT.
- Rajangam, S., Janakiram, S. y Thomas, I. M. (1995). Dermatoglyphics in Down's syndrome. *Journal of the Indian Medical Association*, 93, 10-30.

- Registro Nacional de Población e Identificación personal (RENAPO) (2021). Funciones de la Dirección General del Registro Nacional de Población e Identificación Personal. México. <https://bit.ly/3lcsJSd>
- Reed, T., Reichmann, A. y Palmar, C. G. (1977). Dermatoglyphic differences between 45, X and other chromosomal abnormalities of Turner syndrome. *Human Genetics*, 36, 13–23.
- Rivaldería, N., Gutiérrez-Redomero, E., Alonso-Rodríguez, C., Dipierri, J. E. y Martín, L. M. (2017). Study of fingerprints in Argentina population for application in personal identification. *Science and Justice*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scijus.2017.02.004>
- Ross, S. (2007). *Introducción a la estadística*. (2ª Ed.). Barcelona: REVERTÉ.
- Rodríguez-Silva, J. L. A. (2019). ¿Qué puede hacer el software R para resolver tus problemas?. *Revista Digital Universitaria (UNAM)*, 20(3). <http://doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2019.v20n3.a5>
- Rodríguez, J., Townsend, R. (20 de mayo del 2004). La huella dactilar que el FBI adjudicó a un abogado de EE UU es de un argelio. *El País*. https://elpais.com/diario/2004/05/21/espana/1085090405_850215.html
- Rojas, I. y Sánchez, G. (2012) *Leyes de protección de datos personales en el mundo y la protección de datos biométricos*. Parte I. El valor de la privacidad: datos personales en tiempos del panóptico (UNAM), 31.
- Saini, M. y Kapoor, A. K. (2016). Biometrics in Forensic Identification. Applications and challenges. *Journal of Forensic Medicine*, 1(2). doi: 10.41172/2472-1026.1000108
- Senado de la República (19 de febrero de 2009). *Gaceta del Senado LX/3SPO-333/19479*. https://www.senado.gob.mx/64/gaceta_del_senado/documento/19479
- Serrano, C. (1973). Los dermatoglifos digitales en dos poblaciones mayas de Yucatán. *Estudios de Cultura Maya (UNAM)*, 9, 29-45.
- Serrano, C. (1975). El surco palmar transverso en la población del valle Poblano-Tlaxcalteca. *Anales de Antropología*, 12, 103-115.
- Serrano, C. (1982). Dermatoglifos de coras, huicholes y mestizos de la sierra de Nayarit, México. *Serie antropológica - Instituto de Investigaciones Antropológicas*. UNAM, 51, 155-163.
- Serrano-Sánchez, C. (1969). Los dermatoglifos digitales de la población masculina de Cholula, Puebla. *Anales del Instituto Nacional de Antropología e Historia*, 2, 4-66.
- Singh, K. K., Menka, K., Anand, K., Goel, A., Dontulwar, A., y Rajguru, J. P. (2020). Correlation between dermatoglyphics and dental caries in children: A case-control study. *Journal of family medicine and primary care*, 9(6), 2670–2675.

- Statista Research Department (16 de marzo de 2022). Número de habitantes extranjeros en México en 2020, por nacionalidad. Statista. <https://es.statista.com/estadisticas/1190260/poblacion-extranjera-de-mexico-por-nacionalidad/?fbclid=IwAR07xkF8A1hthMeeDJiF076ySkk6zd9957zm-TFnY41mNWif73OMqVhkb3c>
- Sterne, J. A. y Davey-Smith, G. (2001). Sifting the evidence-what's wrong with significance tests? *BMJ*, 322, 226-231.
- Stoney, D. (2001), Measurement of fingerprint individuality, en H. C. Lee y R.E. Gaenssle (Eds.), *Advances in Fingerprint Technology* (2ª Ed.) (pp. 327–387). CRC Press.
- Suárez-Canlla, C., Caballero-Cornejo, H., Mezzich-Gálvez, J., Oré-De La Cruz, J., Villa-Palomino, D. y Herrera-Cotrino, K. (2021). Comparación de la eficacia de tres métodos dentales para estimar la edad de personas de 13 a 23 años. *Odontología Sanmarquina* [Internet], 24(1), 15-2. <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/odont/article/view/19693?fbclid=IwAR2Xp2bAPehpgnaPfVTNrCR1MFSvHmyKGo9nBkC81KI5xx1WXH0b2QJofo>
- Suazo-Galdames, I. C., Zavando-Matamala, D. A. y Luiz-Smith, R. (2009). Performance Evaluation as a Diagnostic Test for Traditional Methods for Forensic Identification of Sex. *International Journal of Morphology*, 27(2), 381-386.
- Taduran, R., Tadeo, A. K., Escalona, N. A. C. y Townsend, G. C. (2016). Sex determination from fingerprint ridge density and white line counts in Filipinos, *Homo*, 67, 163–171.
- Thakar, M.K., Kaur, P. y Sharma, T. (2018) Validation studies on gender determination from fingerprints with special emphasis on ridge characteristics. *Egyptian Journal of Forensic Sciences*, 8(20). <https://doi.org/10.1186/s41935-018-0049-7>
- Thompson, M. B., Tangen, J. M. y Mccarthy, D. J. (2013). Expertise in fingerprint identification. *Journal of Forensic Sciences*, 58(6), 1519-1530.
- Thompson, T. y Black, S. (Eds.) (2007). *Forensic Human Identification. An Introduction*. CRC Press.
- Thompson, W., Black, J., Jain, A. y Kadane, J. (2017). *Forensic Science Assessments. A Quality and Gap Analysis. Latent Fingerprint Examination*. American Association for the Advancement of Science (AAAS). DOI: 10.1126/srhl.aag278.
- Tistarelli, M. y Champod, C. (Eds.) (2017). *Handbook of Biometrics for Forensic Science*. Springer.
- Tiessen, A., Cubedo-Ruiz, E. y Winkler, R. (2017) Improved Representation of Biological Information by Using Correlation as Distance Function for Heatmap Cluster Analysis. *American Journal of Plant Sciences*, 8, 502-516.

- Tovar, A., (2021). Plataforma México, a un paso de colapsar. Tribuna de la bahía. <https://tribunadelaBahiaMexico-un-paso-colapsar-50714>.
- Trujillo-Arriaga, S. T. (2007). El estudio científico de la Dactiloscopia (2ª Ed.). México: Limusa.
- Turati, M., Tzuc, E., Gómez-Durán T., (2022) México acaba de rebasar la deshonrosa cifra de 100 mil personas desaparecidas. Fragmentos de la desaparición. QuintoLab. <https://quintoelab.org/fragmentos/cien-mil-despariciones-mexico/>
- Ulery, B. T., Hicklin, R. A., Buscaglia, J. y Roberts, M. A. (2011). Accuracy and reliability of forensic latent fingerprint decisions. Proceedings of the National Academy of Sciences, 108(19), 7733–7738.
- United States Census Bureau (30 de diciembre de 2021). U.S. Population Estimated at 332,403,650 on Jan. 1, 2022. Census. <https://www.census.gov/library/stories/2021/12/happy-new-year-2022.html>
- Vatsa, M., Singh, R. y Majumdar, A. (Eds.). (2018). Deep Learning in Biometrics. CRC Press.
- Villalobos-Rangel H. (2018). Las pruebas de ADN en el contexto forense parte II. Interpretación estadística. Revista de Ciencias Forenses de Honduras; 4(2), 17-22.
- Vucetich, J. (1904). Dactiloscopía comparada. El nuevo sistema argentino. Oficina Central de Identificación y Estadística de la Policía de la Provincia de Buenos Aires.
- Wasserstein, R. L. y Lazar, N. A. (2016). The ASA's Statement on p-Values: Context, Process, and Purpose. The American Statistician, 70(2), 129-133.
- Wilkinson, L & Friendly, M., (2009) The History of the Cluster Heat Map, The American Statistician, 63(2), 179-184.
- Yi, M. (2021). A Complete Guide to Heatmaps. Chartio. https://chartio.com/learn/charts/heatmap-complete-guide/?fbclid=IwAR11BgOTfUjxM_v8e1BKASBvAHAxDGCpee5fA7OhhCEyNz5-dg8qz_CHXY
- Zabell, S. (2005) Evidencia de huellas dactilares. Revista de Derecho y Política, 143-79.

ANEXO

Tabla 1. Frecuencias totales de cada uno de los 15 tipos de minucias analizados.

<i>Tipo de minucia</i>	<i>Frecuencia Total</i>
<i>Bif</i>	11088
<i>Cort</i>	13532
<i>Pinter</i>	2532
<i>Enc</i>	1736
<i>Empal</i>	1607
<i>Islo</i>	1540
<i>Interr</i>	825
<i>Desv</i>	665
<i>Trans</i>	570
<i>Cu</i>	213
<i>Pintra</i>	174
<i>Sec</i>	155
<i>M</i>	152
<i>Vuel</i>	146
<i>Tri</i>	75
<i>Total</i>	35010

Tabla 2. Distribución por sexo del total de minucias en función de las zonas central y periférica del dactilograma

	<i>Central</i>	<i>Periferia</i>	<i>Total</i>
<i>Hombres</i>	9824	8281	18105
<i>Mujeres</i>	9850	7055	16905
<i>Total</i>	19674	15336	35010

Tabla 3. Frecuencias totales de minucias por subcuadrante

<i>Tipo de minucia</i>	<i>DIF</i>	<i>DID</i>	<i>DDF</i>	<i>DDD</i>	<i>PDF</i>	<i>PDD</i>	<i>PIF</i>	<i>PID</i>	<i>Total</i>
<i>Bif</i>	894	1614	944	1558	1312	1917	1244	1605	11088
<i>Cort</i>	1071	1600	907	1542	2436	1875	2385	1716	13532
<i>Islo</i>	113	178	134	153	224	264	210	264	1540
<i>Enc</i>	81	205	64	171	317	400	177	321	1736
<i>Interr</i>	105	126	124	130	131	47	99	63	825
<i>Vuel</i>	2	9	6	7	16	36	6	64	146
<i>Trans</i>	82	92	75	103	55	51	76	36	570
<i>Tri</i>	1	14	2	7	4	18	2	27	75
<i>Cu</i>	27	13	18	25	41	20	46	23	213
<i>Sec</i>	16	31	15	21	6	26	14	26	155
<i>Desv</i>	58	83	70	85	101	74	116	78	665
<i>Empal</i>	117	221	107	193	237	333	177	222	1607
<i>M</i>	6	34	8	25	6	31	14	28	152
<i>Pintra</i>	21	20	26	19	34	11	39	4	174
<i>Pinter</i>	194	371	190	294	150	556	183	594	2532
<i>Total</i>	2788	4611	2690	4333	5070	5659	4788	5071	35010

Tabla 3.1 Frecuencias totales por zona central y periférica

<i>Tipo de minucia</i>	<i>Central</i>	<i>Periferia</i>	<i>Total</i>
<i>Bif</i>	6694	4394	11088
<i>Cort</i>	6733	6799	13532
<i>Islo</i>	859	681	1540
<i>Enc</i>	1097	639	1736
<i>Interr</i>	366	459	825
<i>Vuel</i>	116	30	146
<i>Trans</i>	282	288	570
<i>Tri</i>	66	9	75
<i>Cu</i>	81	132	213
<i>Sec</i>	104	51	155
<i>Desv</i>	320	345	665
<i>Empal</i>	969	638	1607
<i>M</i>	118	34	152
<i>Pintra</i>	54	120	174
<i>Pinter</i>	1815	717	2532
<i>Total</i>	19674	15336	35010

Tabla 4. Frecuencias relativas de cada tipo de minucia.

<i>Tipo de minucia</i>	<i>Frecuencia Total</i>	<i>Frecuencia relativa</i>	<i>Porcentaje (%)</i>
<i>Bif</i>	11088	0.3167	31.6
<i>Cort</i>	13532	0.3865	38.6
<i>Pinter</i>	2532	0.0723	7.2
<i>Enc</i>	1736	0.0495	4.9
<i>Empal</i>	1607	0.0459	4.5
<i>Islo</i>	1540	0.0439	4.3
<i>Interr</i>	825	0.0235	2.3
<i>Desv</i>	665	0.0189	1.8
<i>Trans</i>	570	0.0162	1.6
<i>Cu</i>	213	6.0839x10-3	0.6
<i>Pintra</i>	174	4.97x10-3	0.4
<i>Sec</i>	155	4.4273x10-3	0.4
<i>M</i>	152	4.3416x10-3	0.4
<i>Vuel</i>	146	4.1702x10-3	0.4
<i>Tri</i>	75	2.1422x10-3	0.2
<i>Total</i>	35010	1	100

Tabla 5 y 6. Componentes Principales para el sexo masculino.

<i>Tipo de minucia</i>	<i>PC1</i>	<i>PC2</i>	<i>PC3</i>	<i>PC4</i>	<i>PC5</i>
<i>Cortada</i>	0.981055174	0.168717590	-0.053406175	-0.05486042	-0.02436854
<i>Bifurcación</i>	-0.086096153	0.736540705	0.651860138	0.07210813	0.12435470
<i>Punto</i>	0.125618100	-0.595838887	0.722918567	-0.32310113	0.03197870
<i>Intercrestal</i>	-0.040320283	0.065404825	0.070182939	-0.03698734	-0.66247735
<i>Encierro</i>	0.102823239	-0.248939899	0.201562830	0.93613566	-0.08338330
<i>Islote</i>	-0.014174767	0.072305152	0.059282565	-0.03456194	-0.61596851
<i>Empalme</i>	0.038730195	0.032264100	0.004873527	0.08163810	0.25347073
<i>Interrupción</i>	-0.010229583	-0.006332767	-0.014142374	0.03017676	0.21984969
<i>Desviación</i>	-0.017253538	-0.037856249	-0.017947656	0.01938674	0.20853867
<i>Transversal</i>	-0.006055244	-0.005207170	-0.001169831	0.02307756	0.04004449
<i>Cuña</i>					

<i>Tipo de minucia</i>	<i>PC6</i>	<i>PC7</i>	<i>PC8</i>	<i>PC9</i>	<i>PC10</i>
<i>Cortada</i>	0.03588046	-0.002626942	0.033790488	0.010482544	0.0079636446
<i>Bifurcación</i>	0.05943579	0.028212349	-0.006311354	0.010919857	0.0047225542
<i>Punto Intercrestal</i>	-0.03130185	-0.009144639	0.004325795	-0.009255054	0.0002873512
<i>Encierro</i>	0.13040135	-0.698266469	0.197894273	0.068340437	0.0226584231
<i>Islote</i>	0.05030329	0.025968171	-0.010963693	-0.004140017	-0.0135597717
<i>Empalme</i>	-0.48864329	0.569517916	0.205611575	0.045813250	-0.0542862072
<i>Interrupción</i>	-0.84914406	-0.425944295	-0.110526808	0.094403837	-0.0540427599
<i>Desviación</i>	-0.05071223	-0.059750893	0.779896471	-0.541051798	-0.2080703492
<i>Transversal</i>	0.06708989	0.037091522	0.518983112	0.823928347	0.0021574304
<i>Cuña</i>	-0.08817343	0.011746523	0.165659413	-0.111318253	190.1647353

Tabla 7 y 8. Componentes Principales para el sexo femenino

<i>Tipo de minucia</i>	<i>PC1</i>	<i>PC2</i>	<i>PC3</i>	<i>PC4</i>	<i>PC5</i>
<i>Cortada</i>	-0.89972506	-0.405180284	0.031826638	0.087929647	0.08955492
<i>Bifurcación</i>	0.27060127	-0.706999681	-0.630655336	-0.115687136	-0.07883294
<i>Punto Intercrestal</i>	-0.25524914	0.547683397	-0.761122259	0.228534471	-0.04926124
<i>Encierro</i>	0.07244603	-0.061953143	-0.045197538	0.015722610	-0.02950430
<i>Islote</i>	-0.17586718	0.176481881	-0.100084843	-0.961879068	-0.01351360
<i>Empalme</i>	0.09142741	0.016457779	-0.019661953	0.007503604	0.29356914
<i>Interrupción</i>	-0.06768212	-0.002862661	0.091032778	0.020954460	-0.94191163
<i>Desviación</i>	-0.04856931	-0.017546874	0.026897513	0.020912248	0.02821754
<i>Transversal</i>	-0.02260382	0.021228354	-0.008377486	-0.013391595	0.04496959
<i>Cuña</i>	-0.01141079	-0.001284823	0.020659333	0.009287955	-0.07801694

<i>Tipo de minucia</i>	<i>PC6</i>	<i>PC7</i>	<i>PC8</i>	<i>PC9</i>	<i>PC10</i>
<i>Cortada</i>	-0.06226218	-0.055063651	0.004832678	-0.05119707	-0.002456614
<i>Bifurcación</i>	0.05943579	-0.020827468	-0.012802442	0.01943865	0.007832609
<i>Punto Intercrestal</i>	-0.03130185	-0.008027917	0.020140454	0.01285971	0.008212059
<i>Encierro</i>	0.13040135	0.247889273	-0.020143252	0.06275485	0.015508220
<i>Islote</i>	0.05030329	-0.013029370	0.022615254	0.01777144	0.009340746
<i>Empalme</i>	-0.48864329	-0.919214269	0.010052818	0.05159018	0.038390178
<i>Interrupción</i>	-0.84914406	-0.296612582	-0.036701949	0.04203781	-0.073882870
<i>Desviación</i>	-0.05071223	0.042445181	0.155474409	0.98218055	-0.013678640
<i>Transversal</i>	0.06708989	0.002605002	-0.986101416	0.15234270	-0.021042421
<i>Cuña</i>	-0.08817343	0.010422695	-0.021760450	0.01630860	0.995979443

Tabla 9. Frecuencias absolutas y relativas de tipo de minucia respecto al sexo.

<i>Tipo de minucia</i>	<i>Frec. Absoluta Hombres</i>	<i>Frec. Absoluta Mujeres</i>	<i>Total</i>	<i>Diferencia entre sexos</i>	<i>Porcentaje (%) de diferencia</i>
<i>Cortada</i>	6379	7153	13532	774	2.256033578
<i>Bifurcación</i>	5920	5168	11088	752	2.191908593
<i>Punto Intercrestal</i>	1465	1067	2532	398	1.160079282
<i>Encierro</i>	909	827	1736	82	0.239011309
<i>Islote</i>	924	616	1540	308	0.897749796
<i>Empalme</i>	802	805	1607	3	0.008744316
<i>Interrupción</i>	439	386	825	53	0.154482919
<i>Desviación</i>	382	283	665	99	0.288562434
<i>Transversal</i>	326	244	570	82	0.239011309
<i>Cuña</i>	128	85	213	43	0.125335199
<i>Totales</i>	17674	16634	34308		

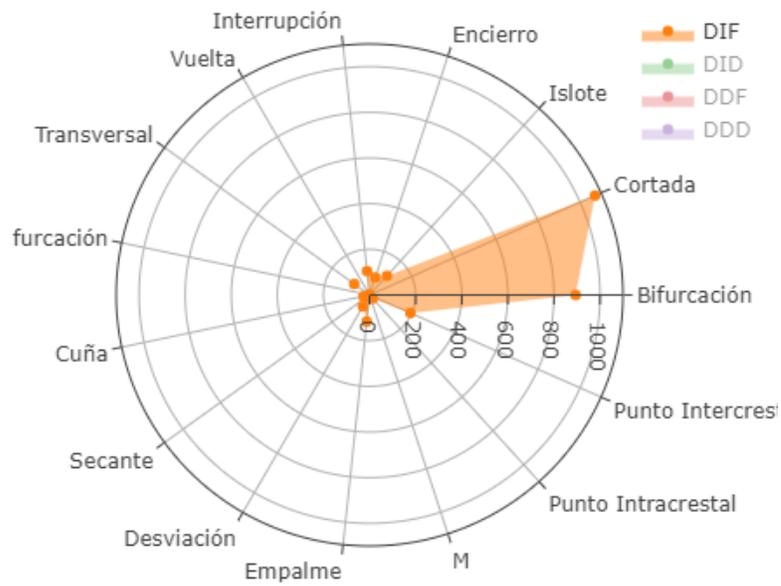


Gráfico 1. Frecuencias de los 15 tipos de minucias en el subcuadrante DIF

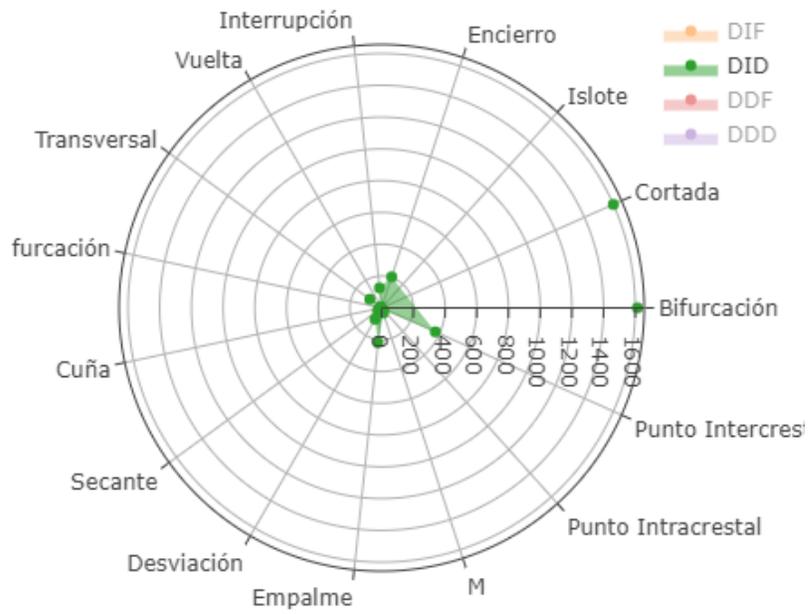


Gráfico 2. Frecuencias de los 15 tipos de minucias en el subcuadrante DID.

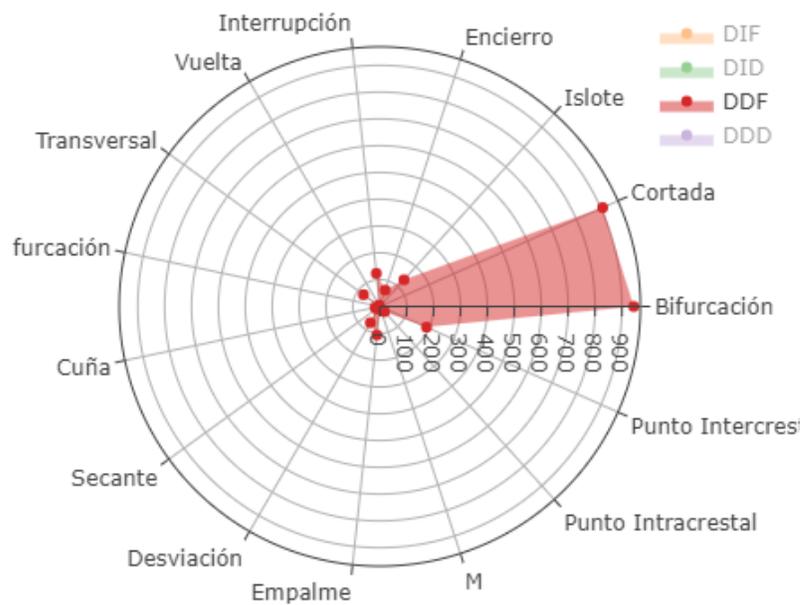


Gráfico 3. Frecuencias de los 15 tipos de minucias en el subcuadrante DDF.

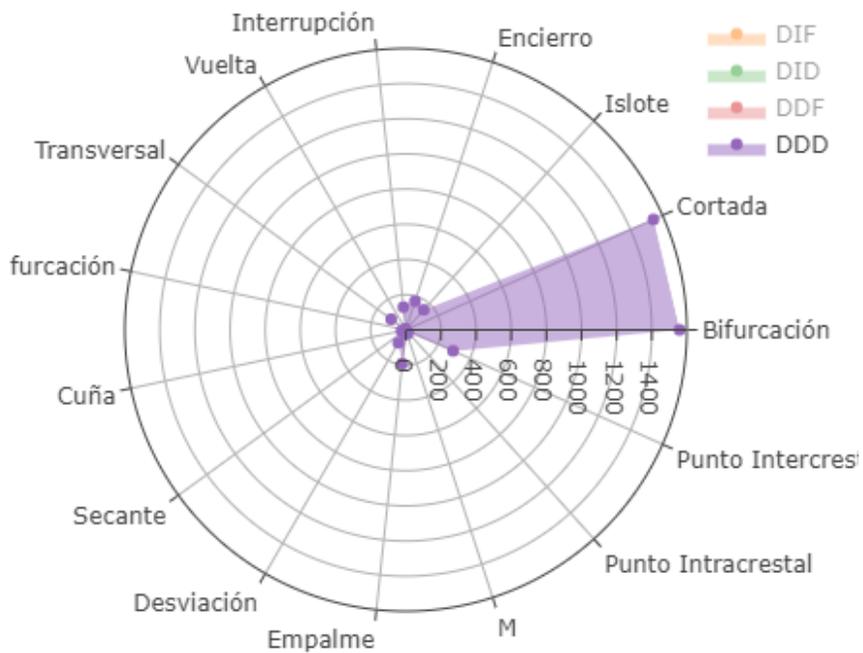


Gráfico 4. Frecuencias de los 15 tipos de minucias en el subcuadrante DDD.

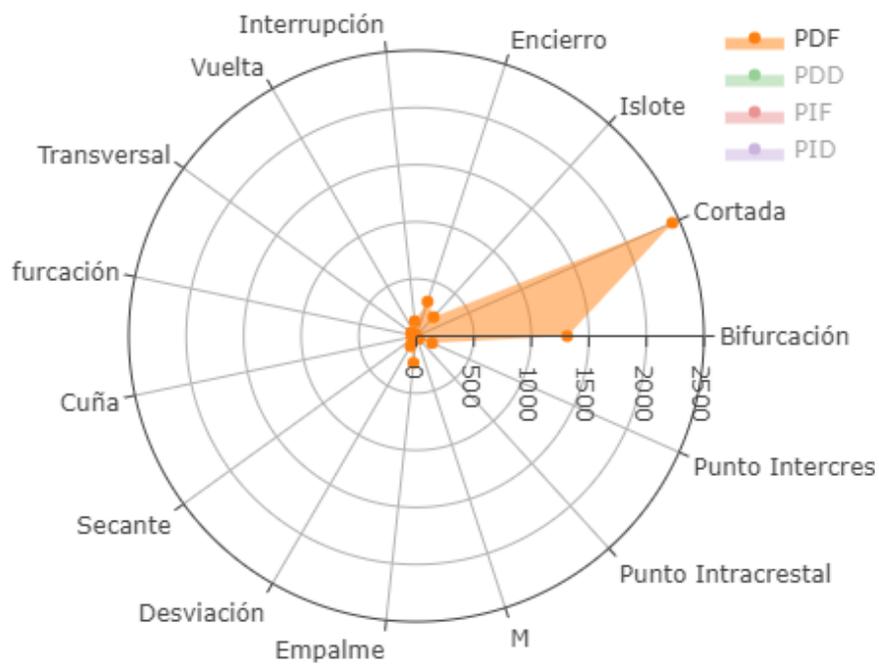


Gráfico 5. Frecuencias de los 15 tipos de minucias en el subcuadrante PDF.

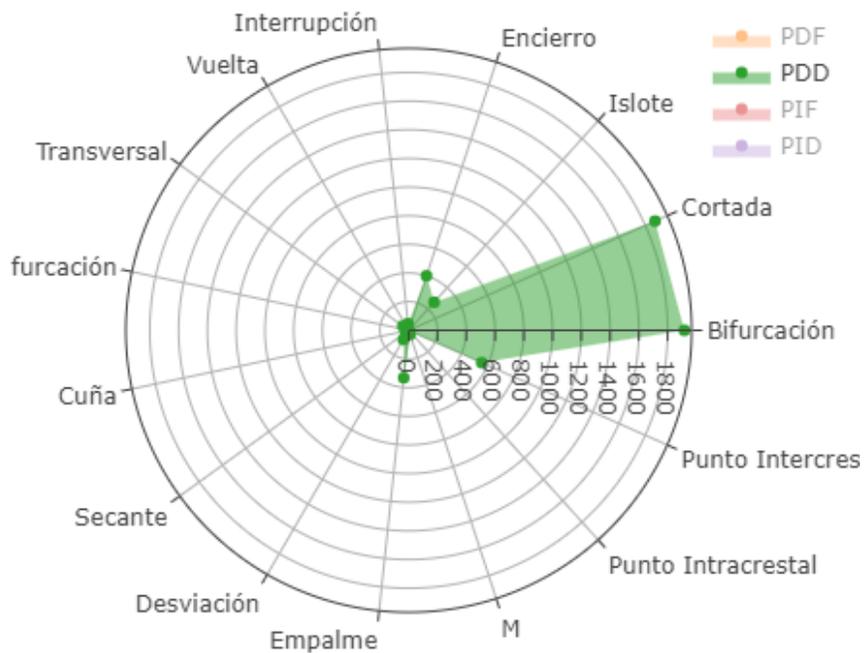


Gráfico 6. Frecuencias de los 15 tipos de minucias en el subcuadrante PDD.

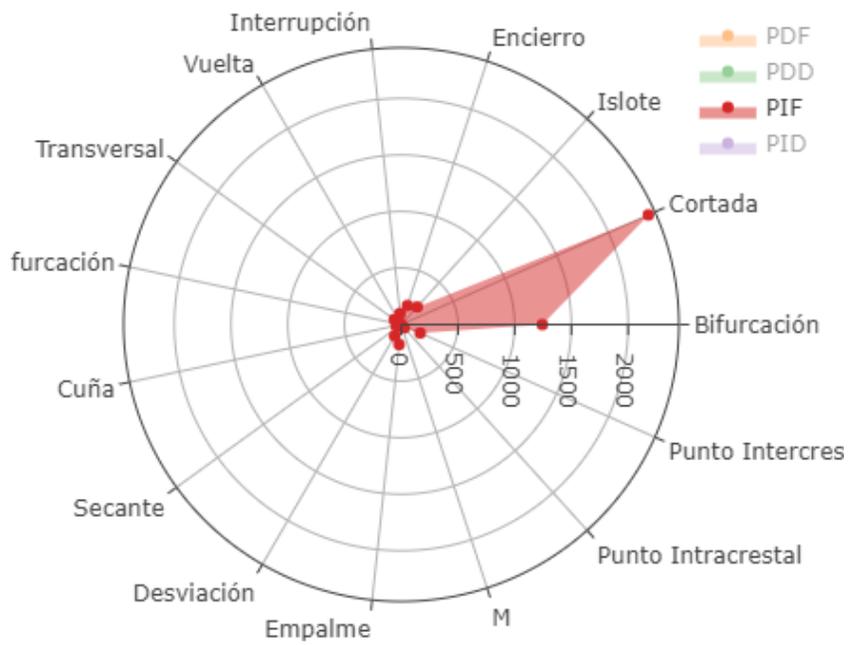


Gráfico 7. Frecuencias de los 15 tipos de minucias en el subcuadrante PIF.

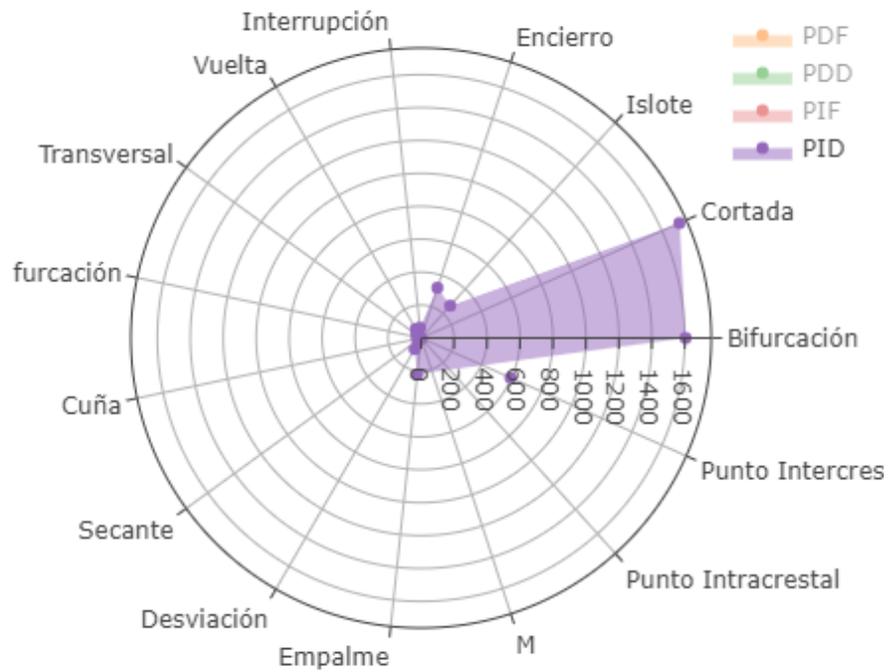


Gráfico 8. Frecuencias de los 15 tipos de minucias en el subcuadrante PID.