



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE MEDICINA
LICENCIATURA EN CIENCIA FORENSE**

**LA FORMA DE LAS ARCADAS DENTALES
PARA LA INDIVIDUALIZACIÓN FORENSE:
MÉTODO DE KIESER ET AL. APLICADO A
MODELOS DENTALES 2D Y 3D EN
POBLACIÓN MEXICANA**

Facultad de Medicina



T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN CIENCIA FORENSE

P R E S E N T A:

JASSO CUÉLLAR JORGE EDUARDO



**CIENCIA
FORENSE**
UNAM

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. MIRSHA E. QUINTO SÁNCHEZ
CDMX, SEPTIEMBRE 2019**



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.

Agradecimientos

A mis amigos y compañeros, porque me aguantaron cuando estuvimos juntos todo el día, y ahora que ya no lo estamos me siguen demostrando que los amigos siempre te apoyarán.

A mis profesores de la licenciatura, con énfasis particular a Mirsha, Chantal e Ivet, por dotarme con todos los conocimientos posibles, aclarar todas mis dudas y darme herramientas para desempeñarme en el campo laboral y de investigación.

A mi familia, en especial a mis padres y hermanos, ya que todo lo que soy se los debo a su apoyo incondicional. Nunca podré dejar de agradecerles por creer en mí, aún cuando ni yo mismo lo hacía.

Finalmente, a la UNAM, casa de estudios que facilitó mi formación durante toda la carrera, dándome becas, conocimientos y experiencias de vida.

Financiamiento

El presente manuscrito fue parcialmente beneficiado por el proyecto PAPIIT-DGAPA IA401818 "Proyecto NN: Colección Osteológica Nacional" y del Proyecto de Desarrollo científico para atender problemas nacionales PN-2016-2518 con el título "Proyecto NN: Protocolos de Identificación Humana, Colección Osteológica Nacional y Base de Datos de Personas No Identificadas y/o Desaparecidas.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
JUSTIFICACIÓN	4
HIPÓTESIS	5
OBJETIVOS	6
MARCO TEÓRICO	7
<i>Órganos dentales</i>	9
<i>Anatomía dental</i>	11
<i>Variaciones en las arcadas dentales</i>	13
<i>Sexo</i>	14
<i>Edad</i>	14
<i>Ancestría</i>	16
<i>Enfermedad, variación individual normal, hábitos de vida y tratamientos dentales.</i>	17
<i>Ciencia forense y el estudio de los órganos dentales</i>	18
<i>Antropología Forense</i>	19
<i>Odontología Forense</i>	21
<i>Identificación humana en el ámbito forense.</i>	22
<i>Arcadas dentales como medios de identificación humana en la ciencia forense</i>	26
<i>Arcadas en la huella de mordedura</i>	27
<i>Arcadas en la identificación comparativa</i>	29
<i>Ventajas del uso de las arcadas dentales sobre otros métodos</i>	30
<i>Posturas ante la individualidad de las arcadas</i>	31
<i>Arcadas dentales como variable individualizadora: A favor</i>	32
<i>Arcadas dentales como variable individualizadora: En contra</i>	33
<i>Morfometría geométrica</i>	35
<i>Landmarks</i>	37
<i>Análisis Generalizado de Procrustes (AGP)</i>	38
<i>Tamaño del centroide (centroid size)</i>	40
<i>Error de medición</i>	41
<i>Formas de disminuir el error de medición</i>	42
METODOLOGÍA	45
<i>Muestra de estudio</i>	47
<i>Fenotipado</i>	49

<i>Acercamiento 2D por fotografía científica.</i>	49
<i>Acercamiento 3D por escaneo de superficie de alta resolución.</i>	50
<i>Protocolo de landmarks: método de Kieser et al. 2007</i>	51
<i>Diseño experimental</i>	54
<i>Estudio de error intraobservador.</i>	54
<i>Caracterización mediante modelo hiperdimensional multivariado.</i>	55
<i>Individuos fuera del rango de variación normal.</i>	56
<i>Exploración del efecto de covariables en la forma: modelo de regresión múltiple 2D y 3D.</i>	56
<i>Estimación de la individualización por conglomerado de la arcada dental: experimento 2D y 3D.</i>	57
<i>Reproducibilidad 2D y 3D: asertividad</i>	59
RESULTADOS	61
<i>Error intraobservador: prueba no supervisada.</i>	63
<i>Prueba supervisada.</i>	64
<i>Caracterización mediante modelo hiperdimensional multivariado.</i>	69
<i>Modelo de regresión multivariada.</i>	70
<i>Tamaño.</i>	74
<i>Análisis de forma (shape).</i>	77
<i>Individualización por conglomerado: Experimento 2D</i>	79
<i>Individualización por conglomerado: Experimento 3D</i>	82
<i>Acercamiento 2D y 3D: Reproducibilidad</i>	84
DISCUSIÓN	85
<i>Sobre el efecto del error intraobservador en la individualización</i>	87
<i>Caracterización de la variación de la arcada dental anterior mediante modelo hiperdimensional multivariado.</i>	91
<i>Tamaño.</i>	92
<i>Sobre el análisis de forma (shape)</i>	95
<i>Individualización por conglomerado: Experimento 2D</i>	96
<i>Individualización por conglomerado: Experimento 3D</i>	97
<i>Acercamiento 2D y 3D</i>	98
CONCLUSIONES	102
REFERENCIAS	103
ANEXOS	113

INTRODUCCIÓN

La identificación humana consiste en el proceso de revisar rasgos o conjunto de características de una persona que lo diferencien de los demás y hacen que sea ella misma (Calabuig & Villanueva, 2004), siendo su objetivo final es establecer la identidad de una persona viva o fallecida, de manera veraz e ineludible, mediante diferentes métodos y técnicas (Quesada García & López Palafox, 2019). Dicho proceso toma como base la comparación entre la información conocida de la víctima (datos *antemortem*) y los resultados obtenidos al examinar a la persona fallecida sin identidad, PFSI (datos *postmortem*), ya sea un cuerpo aún con tejidos o sus restos óseos. Soliéndose dividir en dos grandes grupos, comparativos y reconstructivos (Barraza, 2016). En este caso se hará énfasis en los métodos comparativos, que consisten en la confronta de los antecedentes con los hallazgos encontrados en el estudio antropológico y/u odontológico forense.

Los órganos dentales están formados por el tejido más resistente en el cuerpo debido a sus propiedades y que, además, tiene mayor resistencia a factores destructores (Barraza, 2016); razón por la cual se podrían considerar idóneos para la identificación de PFSI que estuvieron expuestos a condiciones ambientales o intencionales adversas, que pasaron por artificios posteriores al momento del deceso (efectos tafonómicos), o que cuentan con un Intervalo Post Mortem (IPM) amplio.

Existen múltiples estudios que han sustentado la hipótesis de que la arcada dental humana tiene un factor de unicidad, es decir que tiene características morfológicas únicas, y con ello permitiría discriminar entre individuos. Por otro lado, los detractores de esta teoría han sacado a la luz abundantes investigaciones que refutan la idea de características exclusivas entre cada arcada dental, en ellos la mayoría sugieren que las arcadas dentales pueden ser clasificadas en categorías que permitirían diferenciar patrones, mas no puede llegarse al extremo de considerarse que este patrón sea singular para cada individuo (Bush, Bush, & Sheets, 2011a).

En la presente tesis el material de estudio son las arcadas dentales, intentando descifrar si presentan características que permitan individualizarlas entre ellas al grado de ser un marcador inequívoco de identidad. Esta interrogante ha deambulado durante un tiempo en

el ámbito forense, estudiándose que las características dentales son equiparables al análisis de ADN mitocondrial (Madi & Swadi, 2013), siendo expresada como que “las arcadas dentales son estructuras individualizantes como lo pueden llegar a ser las huellas digitales o el análisis de ADN”, que es más una creencia subjetiva que un hecho científicamente probado en su totalidad. Por ese motivo en esta investigación se pretende determinar estadísticamente si existen suficientes factores particulares e individualizadores que permitan discriminar una persona de otra usando la metodología sugerida por Kieser dentro de la población mexicana muestreada. Demostrando así su eficiencia y validez en el contexto de identificación científica forense de PFSI, dando con ello una herramienta extra a la antropología y odontología forense, cuando los cuerpos que no estén en condiciones idóneas para ser identificados por otros medios convencionales. Respondiendo así a dos preguntas centrales del proyecto:

1. ¿La forma de los dientes anteriores permiten diferenciar de manera satisfactoria a un individuo en un caso forense?
2. Y en caso de una respuesta afirmativa, ¿cuál de los dos tipos de modelos, 2D o 3D, da mejores resultados en la individualización?

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

México se encuentra en una situación de lo más alarmante, la razón es que según la Comisión Nacional de Derechos Humanos entre enero de 2007 y agosto de 2018 se han exhumado 3,926 cuerpos sin vida de las 1,307 fosas clandestinas encontradas en esos 11 años (Xantomila, 2018). Por este motivo, los números de personas fallecidas sin identificar (PFSI) han aumentado en años recientes, dejando a las dependencias de gobierno en condiciones no favorables para realizar sus funciones en materia de identificación humana forense, siendo el ejemplo más extremo el caso del tráiler con más de 150 cuerpos que estuvo deambulando por las delegaciones de Guadalajara, Jalisco (BBC, 2018).

La problemática anterior es de origen multicausal, es decir, pudo surgir por la falta de personal calificado, sobresaturación de trabajos de identificación humana, por la oleada de violencia que se ha incrementado en los últimos años o debido a que los métodos están resultando ineficientes para poder identificar a estas personas y entregar a sus familiares. Este

proyecto se enfocará en crear una acción de mitigación a la última de las posibles causas, adecuando a la población mexicana un método que podría ayudar a facilitar el trabajo en campo y laboratorio, para la identificación de una persona, lo cual es un trabajo de los peritos forenses en materia odonto-anropológica (Tirol-Carrillo & González-Rodríguez, 2018).

La identificación humana forense ha tenido una transformación exponencial en el último siglo, ya que ha evolucionado desde el reconocimiento directo, donde una persona señalaba a otra sin tener mayor prueba que su dicho, hasta la aplicación de pruebas robustas y científicas para sustentar la identidad, como el caso del análisis de ADN en el ámbito forense (Quesada García & López Palafox, 2019). Estas mejoras en la metodología se originan por el valor que se da al sustento científico para poder admitir evidencia en juicio, siendo este uno de los objetivos cuando se realizan las técnicas, por expertos en áreas forenses, con base en protocolos que permitan la admisión de pruebas en el sistema de justicia (Page, Taylor, & Blenkin, 2011).

En la actualidad, existen múltiples métodos para la individualización científica ayudando a la identificación de una persona, por ejemplo, la Interpol reconoce como métodos de identificación primarios más usados los análisis odontológicos, huellas dactilares y ADN (Vargas, 2016), no obstante esta última no siempre es la opción más viable debido al precio y degradación de la muestra en condiciones no favorables. Por ello, el desarrollo de alternativas que permitan llegar a un resultado equiparable a la técnica del ADN es necesario y de suma importancia. En este sentido la odontología forense ha jugado un papel importante en la identificación debido a que las estructuras dentales contienen información que permiten llegar a la identidad de un individuo (Tirol-Carrillo & González-Rodríguez, 2018).

Kieser en 2007 (Kieser, Bernal, Waddell, & Raju, 2007) creó una metodología que le permitió demostrar, en una población de Nueva Zelanda, que existían variables en los dientes anteriores que le daban un valor único a cada sujeto y por ello apoya la teoría de que las arcadas dentales tienen variables que las hacen particulares e irrepetibles en cada sujeto. Sin embargo, en México este método no es empleado en las instancias de Procuración de Justicia, por ello para poder ocupar este método se debe sustentar si la forma, disposición y tamaño de la arcada dental son factores únicos en la población mexicana, una cuestión que ha estado en debate en los últimos años para otras poblaciones (Bush, Bush, & Sheets, 2011b).

El presente trabajo de investigación se enfoca en apoyar la hipótesis anteriormente expuesta, “la forma, disposición y tamaño de las arcadas dentales son caracteres únicos en cada individuo”, para ello se replica el estudio de Kieser, evaluado su efectividad en una muestra de individuos mexicanos, empleando morfometría geométrica y estadística multivariada, con lo que se argumentará entonces la propuesta del uso de esta herramienta para la identificación de una PFSI.

JUSTIFICACIÓN

Existe cierta importancia en continuar experimentando en técnicas de identificación humana, y más aún en adaptar técnicas ya conocidas a la población dependencia, que es la población en la cual se sitúa nuestro sujeto de estudio.

Siendo que en la actualidad se pide a los peritos en campo que estén actualizados con los métodos que se están descubriendo periódicamente y dejar atrás aquellos que se han vuelto obsoletos con el paso del tiempo, implicando la actualización en la forma de organización y funcionamiento de múltiples instituciones (PGR, 2015).

Esta investigación propone un método para ayudar a la identificación forense de un individuo, en especial en los casos en los que el ADN o huellas dactilares no son una opción por las condiciones en las que se encuentra la PFSI, apoyando la generación de más y mejores alternativas para ayudar a los familiares a encontrar a una persona desaparecida siendo el punto principal para realizar el presente proyecto.

Aunado a ello, hace pensar de manera indirecta, el fundamento del análisis de una huella de mordedura, estudio que aún se encuentra en el catálogo de los servicios periciales (PGR, 2015), demostrando que si bien la piel no es el elemento idóneo para preservar las características de una arcada dental, esta última si tiene características que permiten diferenciarlas del resto.

Al final de todo, y dependiendo de la continuidad o uso de estos estudios, se podría tener a la mano una nueva metodología que facilite el trabajo de los peritos en campo y ayude a robustecer las investigaciones en materia de identificación forense tanto antropológica como odontológica, pudiéndose realizar una comparación entre un modelo de yeso o digital y la arcada de una PFSI.

HIPÓTESIS

Usando la metodología de Kieser et al. 2007 se espera que la distancia fenotípica entre cada par de individuos de una muestra de individuos mexicanos sea la mínima en el morfoespacio de forma respecto de cualquier otro de la muestra, generando, por lo menos, un 85% de clasificaciones correctas entre pares de individuos en un análisis de *cluster* multivariado con distancias euclidianas simples. Con lo que se podría asumir que la forma y tamaño de los dientes anteriores permiten diferenciarlos de manera satisfactoria siendo un factor individualizante que puede ayudar en una identificación forense positiva.

Como hipótesis secundaria, se espera que los modelos dentales en tercera dimensión tengan mayor porcentaje de apareamientos correctos que los modelos en dos dimensiones, volviendo al primero en un mejor método de individualización.

OBJETIVOS

La presente tesis tiene como finalidad demostrar si las arcadas dentales anteriores permiten individualizar sujetos usando la metodología de Kieser para población mexicana. Es por ello que el objetivo general es realizar una validación del método de análisis de forma de las superficies incisales de los órganos dentales anteriores de Kieser para la individualización forense en una muestra de moldes dentales de individuos mexicanos en 2D y 3D.

Los objetivos específicos son:

- Verificar que el patrón de forma de los dientes anteriores son variables únicas en cada persona y con ello demostrar que el método de Kieser puede ser aplicado en la población mexicana.
- Realizar una estimación del error intraobservador en los métodos 2D y 3D aplicados.
- Comparar la reproducibilidad del método de Kieser en los resultados de la validación en fotografías digitales de los modelos dentales (2D) respecto de los escaneos de superficie (3D).

MARCO TEÓRICO

Órganos dentales

Los órganos dentales, o dientes, pueden ser definidos como pequeños órganos conformados por una corona, cuello y raíz (Herrera Saint-Lu, Barrientos, Fuentes Santoyo, & Alva Rodríguez, 2008). Siendo pequeñas estructuras mineralizadas, formadas por dentina, esmalte, ubicado únicamente en la corona, y cemento (Byers, 2017); la principal función de los dientes es la de masticar y ayudar en la producción de sonidos, en el caso humano a hablar (Christensen, Passalacqua, & Bartelink, 2014).

El conjunto de estos órganos dentales, en forma de arco, se conoce como dentadura; por ello se considera a los dientes como la unidad anatómica de la dentadura. Estos arcos, conformados por la inserción de los dientes en un hueso esponjoso, se les conocen como arcadas dentales, en todos los vertebrados se cuenta con una arcada superior, llamada maxilar, y una arcada inferior, también conocida como mandíbula (Perez, Rojas, Rivas, & Aguilar, 2011).

Durante el desarrollo del ser humano se tienen dos denticiones (Figura 1), la dentición temporal y la permanente (Christenssen, Passalacqua, & Bartelink, 2014). La primera de ellas, la dentición temporal, es aquella que aparece de los 3 a 6 meses de edad y a los 6 años las raíces son reabsorbidas y las coronas se caen/exfolian o son extraídas, dando lugar a la dentición permanente, la cual termina de erupcionar entre los 18 y 21 años (Perez et al., 2011). Los dientes empiezan a desarrollarse en el útero a las 6 semanas de gestación (Alqahtani, Hector, & Liversidge, 2010) con un proceso de erupción y maduración secuencial que puede servir para calcular la edad cronológica (Alqahtani, Hector, & Liversidge, 2014). Siendo el tercer molar el último diente en erupcionar, a los 21 años aproximadamente, sin embargo, otras evidencias del paso del tiempo en los dientes es mediante la observación del tamaño de las superficies oclusales (Hillson, 2005), debido al desgaste ocasionado por la abrasión, atrición y erosión originados por el uso de estos órganos (Scoot & Irish, 2013).

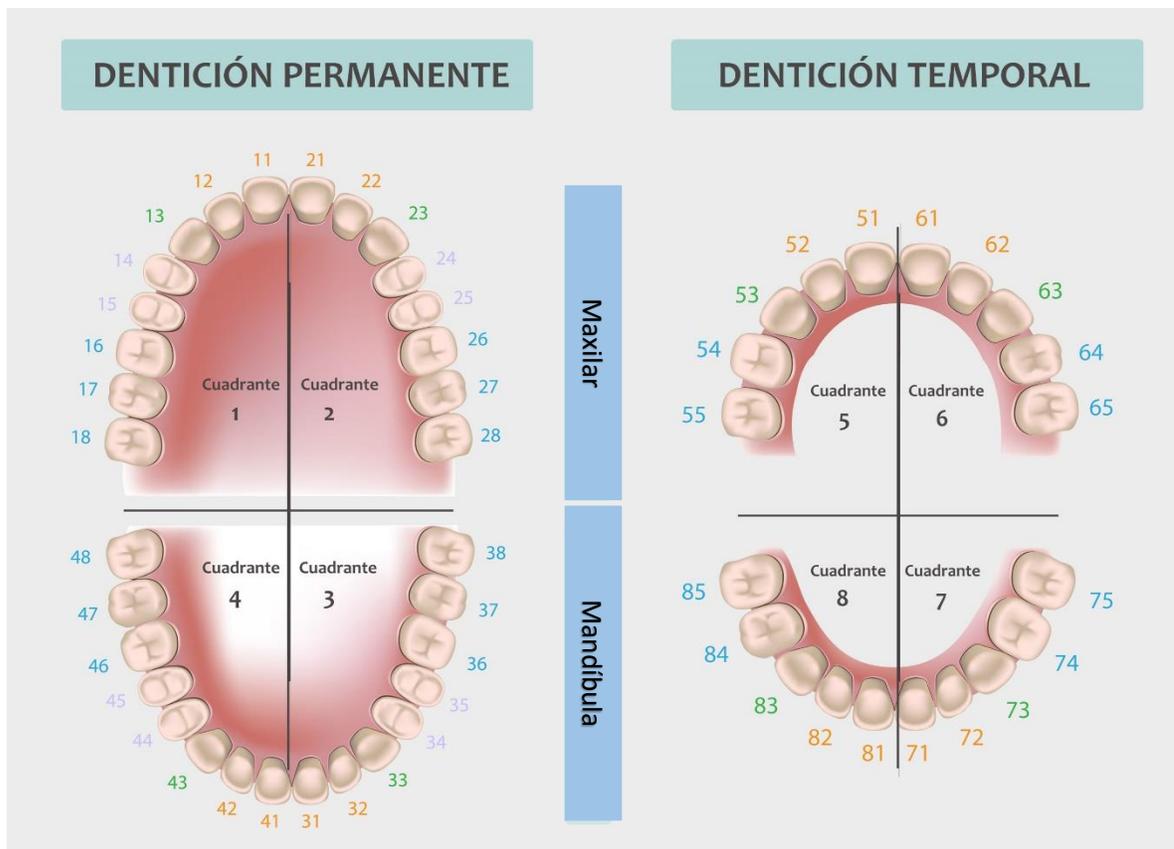


Figura 1. Tiempos de eclosión dental. Ambas denticiones con la nomenclatura de la FDI. Imagen extraída de <https://www.ilerna.es/blog/fp-online/codigo-internacional-dientes-fdi>

Algunos datos relevantes del orden en que se desarrollan los dientes son que los incisivos se forman antes que los molares, los dientes inferiores antes que los superiores, a excepción del primer molar permanente que erupciona a los 6 años y el incisivo central inferior permanente a los 7 años (Houck & Siegel, 2010).

El presente trabajo se enfocará principalmente en la dentadura permanente o adulta, conformada por una totalidad de 32 dientes, de los cuales 16 son superiores y 16 son inferiores. La localización de los dientes en la arcada sigue un orden constante en unidades pares derechas e izquierdas y dependiendo de este orden particular son las funciones que cumplen en el sistema masticatorio. Según su morfología los órganos dentales que forman parte de la dentición adulta se puede clasificar en 4 tipos, incisivos, caninos, premolares y molares (Christenssen et al., 2014)

El orden específico se basa en la línea media hacia la parte posterior del hueso, llevando por nombre, según la nomenclatura observada en la figura 1 y tomando como base con objetivo de explicar únicamente el cuadrante 1 ya que se repite en los otros cuadrantes,

incisivo central (11), incisivo lateral (12), canino (13), primer premolar (14), segundo premolar (15), primer molar (16), segundo molar (17) y tercer molar (18) (Nelson, 2010).

El conjunto de los incisivos y el canino, tanto de lado izquierdo como derecho, conforman los dientes anteriores, cuya principal función es cortar. Mientras que los premolares y molares, que tienen la función de triturar, son conocidos como dientes posteriores (White, Black, & Folkens, 2012). Estudios antropológicos han demostrado que los dientes anteriores armonizan con la forma de la cara y las estructuras faciales determinando su contorno y tamaño (Perez et al., 2011), es decir presentan una alta covariación.

Anatomía dental

Los dientes, a pesar de tener diferente morfología entre grupos, tienen características generales entre sí, estando conformados por la corona, que es la parte cubierta por esmalte y no tiene riego sanguíneo; cuello, que señala el fin del esmalte, y raíz, que está cubierta por cemento (White et al., 2012).

Para entender la anatomía de los dientes se debe comparar la corona con un cubo, siendo que sus superficies se llamaran caras, la unión de dos caras forma una arista o ángulo línea, y la unión de tres caras forma un ángulo punta. En los dientes existen dos caras proximales, que son las que hacen contacto con otro diente sin ocluir, la cara que está más cercana a la línea media se denomina mesial, mientras que la que está más alejada es distal (Houck & Siegel, 2010).

En los dientes anteriores la cara que tiene contacto con otro diente al ocluir se denomina incisal, mientras que en los posteriores esta misma se denomina oclusal (Figura 2). La cara que tiene contacto con los labios se denomina labial en el caso de los dientes anteriores, mientras que en los posteriores recibe el nombre de vestibular (Christenssen et al., 2014).

La cara que tiene contacto con la lengua se denomina cara lingual (Figura 3), en el caso de los dientes inferiores, por su parte en los dientes superiores se llama palatina por tener contacto con el paladar (Nelson, 2010).

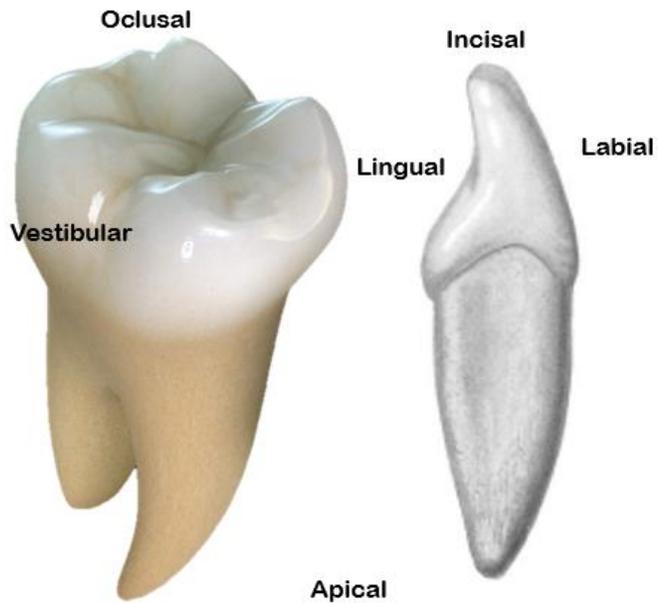


Figura 2. Nomenclatura anatómica del diente. Nomenclatura de las diferentes caras de un órgano dental posterior, en la izquierda, y un órgano dental anterior, a la derecha. Imagen modificada de *Google Images*¹.

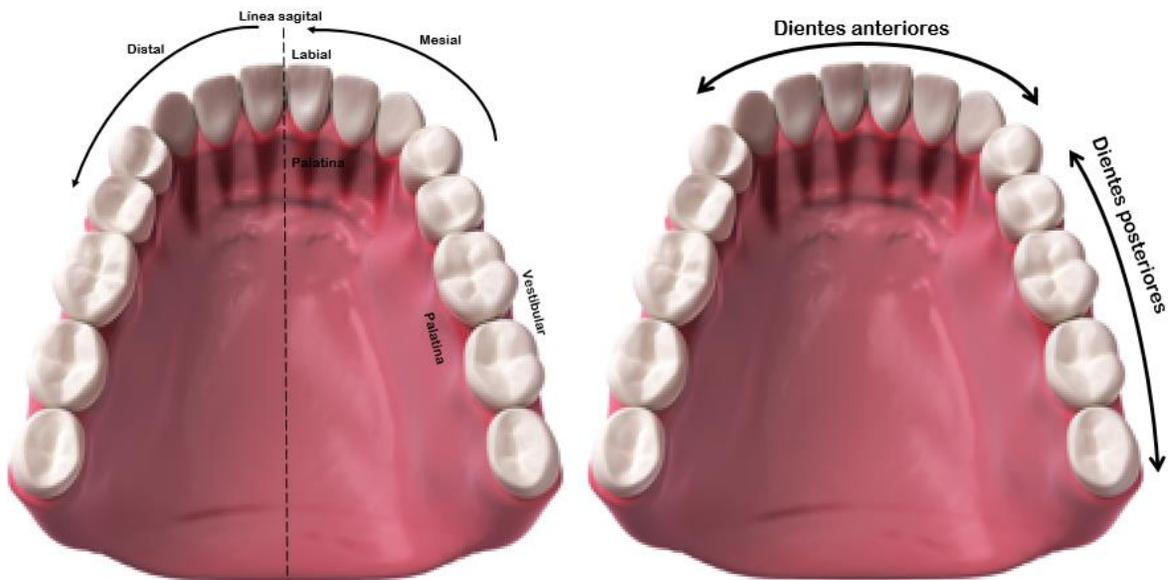


Figura 3. Nomenclatura anatómica dental humana de la arcada, mostrando las diferentes caras de los dientes de acuerdo a su ubicación en la arcada. Imagen modificada de *Google Images*²

¹ <https://www.kisspng.com/png-human-tooth-maxillary-first-molar-tooth-decay-6317955/>

² http://wagnermunhoz.klicksite.com.br/orofacial_3/

Variaciones en las arcadas dentales

Las arcadas dentales pueden variar en su forma y tamaño, del mismo modo puede llegar a variar la disposición de los dientes, lo cual es ocasionado por distintos factores. Estos factores generan un patrón único que pueden llegar a aumentar la variabilidad del individuo, y depende muchas veces de condiciones ambientales a las que una persona se ve expuesta e inclusive puede ser ocasionado por la genética misma, además de que pueden llegar a variar el tamaño y disposición de los dientes, generando un patrón único dependiendo de las condiciones a las que se ve expuesto una persona. Dichos factores se resumen en genéticos, epigenéticos y ambientales.

Los factores genéticos definen la manera en que el fenotipo dental se presenta basado en el ADN del individuo, mientras que los factores ambientales son las condiciones a las que se ve expuesta un individuo y con ello afecta el patrón dental (Grippaudo et al., 2016). Por su parte, los factores epigenéticos pueden ser entendidos como los cambios en la función y expresión de los genes que son heredables, que no entrañan una modificación en la secuencia del ADN y que pueden ser reversibles (Holliday, 1994).

Es debido a estas condiciones, que afectan la manera en que se presenta una característica, que un individuo tiende a tener patrones similares que otro de la misma población, sin embargo, distan fenotípicamente de un individuo de otra población. Por ello se debe de adecuar el estudio a la población de referencia en la que se sitúa nuestra muestra, dado que así se disminuye el error ocasionado debido a que la información en la que se basa el estudio procede de poblaciones que distan biológica y culturalmente de la nuestra (García Castillo & Álvarez Cárdenas, 2016).

Luego entonces, los dientes pueden brindar información de diferentes caracteres que afectan la variación de las arcadas, como son el sexo, edad y ancestría (Moreno & Moreno, 2002). Aunado a algunas variaciones de la morfología originadas por enfermedades (White et al., 2012) o tratamientos estéticos (Sheets et al., 2011) que pueden llegar a afectar la varianza esta estructura.

Sexo

El dimorfismo sexual se define como las diferencias en estructura, dimensiones y apariencia entre sujetos masculinos y femeninos. Las arcadas dentales también son referencia de este fenómeno, siendo una de las teorías más conocidas que el tamaño de los dientes varía dependiendo del sexo y complexión del individuo (Garn, Lewis, Swindler, & Kerewsky, 1967).

Es por ello que se considera que los dientes de un individuo masculino tienden a ser más grandes que los de un individuo femenino, dado que teóricamente los hombres suelen tener un mayor tamaño y complexión que una mujer (Brace & Ryan, 1980). Aunado a lo anterior, existen ciertos caracteres sexuales secundarios que se manifiestan en las arcadas conforme la edad avanza, un ejemplo es la pronunciación del mentón en el caso de los hombres conforme se alcanza la madurez (Tirol-Carrillo & González-Rodríguez, 2018).

Algunos estudios demuestran que este dimorfismo puede tener una explicación basada en la histología, ya que hay presencia de mayor cantidad de dentina en la corona de los sujetos masculinos, haciendo los dientes de mayor tamaño y mayor peso (Schwartz & Dean, 2005), indicadores de robustez.

Edad

La edad cronológica es el tiempo transcurrido a partir del nacimiento de un individuo hasta la fecha en que se realiza la medición para estimarla. Mientras que la edad biológica es el deterioro que presenta nuestro cuerpo conforme avanzan los años, que no necesariamente tiene que ser exactamente la misma que la cronológica. La estimación de la edad al momento de muerte es un paso importante para la identificación de restos humanos, ya que aumenta las posibilidades de una identificación positiva (Blenkin & Evans, 2010).

Uno de los métodos más usados es la estimación de edad mediante los dientes, ya que tienden a resistir factores destructores, como la inhumación, y por ende la estimación de edad dental muestra menos variabilidad que la edad calculada con todo esqueleto (AlQahtani et al., 2010). Existen algunos factores a tomar en consideración en la estimación dental, por

ejemplo que las mujeres tienden a tener un desarrollo y maduración dental más avanzado que los hombres (Christensen et al., 2014).

En cuanto a las arcadas dentales, como ya se mencionó, la edad biológica la separa en dos denticiones, dentición temporal y dentición permanente (Perez et al., 2011). Esta clara diferencia en la morfología hace más sencillo calcular la edad en un individuo subadulto, puesto que los dientes deciduos y permanentes tienen una cronología de erupción bastante documentada. Para ello se usan láminas en las cuales se muestra de manera gráfica la erupción, y formación tanto de raíz como de corona, de cada diente de manera secuencial, lo que permite una estimación dental confiable (AlQahtani et al., 2010). Siendo el Atlas Londinense uno de los métodos más certeros para la estimación de edad con ayuda de estos gráficos (Alqahtani et al., 2014).

El método basado en los estándares de Sidney permite estimar la edad mediante el nivel de desarrollo de los componentes histológicos de los dientes, con ayuda de radiografías, demostrando un mayor nivel de exactitud sobre otros métodos, como puede ser el de Demirjian en 1986 (Blenkin & Evans, 2010).

Una vez que los dientes permanentes han erupcionado completamente estimar la edad en adultos se convierte en una tarea más complicada. Sin embargo, los dientes sufren diferentes cambios microscópicos que permiten la estimación mediante técnicas histológicas (Christensen et al., 2014). Algunos ejemplos son la técnica de Lamendin (Lamendin et al., 1992) que se enfoca en calcular la transparencia radicular de manera visual, por otro lado existe la técnica de Gustafson (Gustafson & Malmö, 1950) quien observa la deposición de dentina en la cámara pulpar, absorción radicular, la deposición de cemento, entre otros factores histológicos. Por su parte, la pulpa dental llega a mostrar disminución de tamaño ocasionado por la formación de dentina secundaria, ocasionados por los odontoblastos, en un promedio de 6.5 micras por año en la corona y 10 en la raíz (Regalado Ruiz, 2015)

Un marcador que suele usarse, relacionado con técnicas histológicas, es el desgaste natural que se va originando debido a la atrición conforme aumenta la edad biológica (Barrientos, 2001). El esmalte es un tejido altamente mineralizado por lo que solo puede ser alterado por la atrición, modificaciones o desmineralización (White et al., 2012). Siendo que

la atrición o desgaste dental debe ser entendida como la reducción del tejido dentario por el contacto que se produce entre los dientes antagonistas (Calabuig & Villanueva, 2004).

Otro indicador en ocasiones usado es el cambio del color del diente, el cual puede ser explicado por el aumento de nitrógeno que se da conforme la edad avanza o el agrietamiento de la superficie que genera cambio en la refracción de la luz del diente (Calabuig & Villanueva, 2004).

No obstante, estos últimos métodos no tienen la suficiente investigación para darle una base científica (Ball, 2002; Devos & Willems, 2009; Vaidya et al., 2015), por lo que no es muy recomendable usarse en campo hasta que se hagan mayores estudios de validación de los mismos.

Ancestría

La ancestría hace referencia al origen geográfico ancestral de una persona (Christensen et al., 2014), la cual se estima con base en características morfológicas únicas asociadas a la variación filogenética entre los individuos de una población.

Para estimar la ancestría comúnmente se usa una combinación de datos morfológicos dentales, con características observables de otros huesos, para explicar qué nivel de variación existe entre poblaciones con el fin de aprender cómo pueden estar relacionadas. Sin embargo, nuevas estrategias se están implementando, las cuales hacen uso de funciones discriminantes y le dan mayor certeza científica a las estimaciones (Edgar, 2013).

El mestizaje ha provocado que estos rasgos vayan disminuyendo o desapareciendo con el tiempo, sin embargo, un ejemplo de estos caracteres son los dientes en forma de pala, los cuales están relacionados con poblaciones de descendencia amerindia y asiática (Valera et al., 2016).

Algunos ejemplos más de la variación en la morfología dental ocasionados por la ancestría son aparición de una cresta mesial en caninos en poblaciones afrodescendientes y la creencia de la presencia del tubérculo de Carabelli en personas con descendencia europea (Edgar, 2009).

Dichos caracteres han sido condensados en un sistema de análisis no métrico en la universidad de Arizona, el ASUDA (*Arizona State University Dental Anthropology System*) (Turner, Nichol, & Scott, 1991), un sistema que se basa en el análisis de modelos que representan físicamente estos caracteres desde el mínimo al máximo grado de expresión (López-Lázaro et al., 2016). Gracias a ello, se pueden analizar la presencia de los caracteres relacionados con la ancestría, como pueden ser los dientes en pala, doble pala, presencia de tubérculo de Carabelli, cresta mesial del canino, hipocono, entre otros (Bryan, 2013). No obstante, este método necesita un alto nivel de conocimiento de la morfología de los dientes y estar en constante actualización con el método ya que este cambia con el tiempo (Edgar, 2017)

Enfermedad, variación individual normal, hábitos de vida y tratamientos dentales.

Finalmente, otra fuente de variación de la morfología de las arcadas dentales puede ser originada por condiciones de enfermedad o situaciones que estadísticamente se salen de la norma y que están presentes en el individuo. Ejemplos básicos de esto son las giroversiones de dientes, maloclusiones, dientes supranumerarios, desgaste dental, dientes ausentes, entre otros casos en los cuales no existe una explicación clara para ello, pero se cree que son originados por la genética o hábitos del individuo (Díaz et al., 2013).

Otros casos de enfermedades, son el carcinoma, el cuál puede llegar a afectar la forma de la arcada dental conforme la enfermedad va en progreso (Jones & Franklin, 2006) y que en ocasiones es originado por un absceso mal tratado, el cual es un conjunto de pus en una cavidad que fue formada por la degradación del tejido (White et al., 2012). Inclusive la periodontitis puede coadyuvar a la modificación de las arcadas, siendo que esta enfermedad provoca recesión del hueso alveolar y si no es tratada los agentes infecciosos aumenta, dando origen a un posible absceso (White et al., 2012).

Por su parte, el tratamiento dental, que se usa para controlar dichas fuentes de variación, también es de gran ayuda para la identificación de una persona mediante los registros dentales que se puedan tener de estas intervenciones y cotejarlas con el individuo a estudiar (David Sweet, 2010). Los registros de estos tratamientos necesitan ser de calidad y

con un buen registro, ya que el éxito de la confronta depende de la información previa con la que se cuenta (Reddy, Reddy, Sharma, & Aggarwal, 2016).

Ciencia forense y el estudio de los órganos dentales

Una vez que ya se revisó las generalidades necesarias de los dientes, es necesario conocer como participa el estudio de los órganos dentales en la ciencia forense. Para ello se debe definir lo que es la ciencia forense, la cual puede ser descrita como la aplicación del amplio espectro de ciencias en función de coadyuvar en cuestiones de interés legal (Reddy et al., 2016).

Por lo tanto, el término se puede dividir en sus dos componentes, ciencia y forense. El término ciencia hace referencia a la colección de metodologías sistemáticas usadas para incrementar el entendimiento del mundo físico (Houck & Siegel, 2010).

Por su parte el término forense se deriva de la palabra en latín “*Forum*” que literalmente significa público, dicha palabra fue acuñada en la antigua roma, siendo que el senado se reunía en el “*Forum*” donde se debatían temas de política y relacionados con asuntos policiales (Houck & Siegel, 2010).

En el sistema anglosajón es común que sea definida como la ciencia encargada de asociar personas, lugares y situaciones que están involucradas con criminales (García Castillo & Álvarez Cárdenas, 2016), siendo una ciencia que se asiste de múltiples disciplinas para la investigación de los hechos delictivos que le competen.

Sin embargo, otra definición más completa es que se trata de la demostración de las relaciones entre la gente, lugares y cosas involucradas en casos legales mediante la identificación, análisis y si, es posible, individualización de la evidencia (Pérez Campos & García Castillo, 2017). La ciencia forense se hace valer de múltiples herramientas analíticas, las cuales provienen de las ciencias exactas, principalmente biológicas (antropología, medicina, odontología), químicas (toxicología, farmacología), y físicas (balística, fuegos y explosivos), sin embargo también hace uso de las disciplinas humanísticas y ciencias sociales, como son la psicología y victimología (García Castillo & Álvarez Cárdenas, 2016).

La anatomía de la boca es de suma importancia en la ciencia forense, ya que los dientes son los únicos elementos del esqueleto que están en contacto directo con el ambiente, por lo que pueden reflejar condiciones a las que el individuo estuvo expuesto durante su vida (Houck & Siegel, 2010), por ello en esta ocasión se hará énfasis en el estudio de estos dos conceptos y las ciencias que los estudian, la antropología forense, que estudia en general el esqueleto, y la odontología forense, que analiza el sistema estomatognático.

Estas dos ciencias suelen ser complementarias en el campo, y en muchas ocasiones trabajan a la par, ya que en ocasiones la información obtenida de elementos óseos es insuficiente, por lo que la odontología ayuda a dar solución en estos casos. En conjunto ambos se encargan de dar elementos del perfil biológico de una PFSI, siendo que ambas deben llegar a unificar una edad con base en los elementos que cada uno estudia.

Antropología Forense

Etimológicamente, el término antropología proviene de las palabras griegas “*anthropos*” (hombre) y “*logia*” (estudio o ciencia), por resultado se podría definir como el estudio del hombre o la especie humana. Por ende, la antropología es una manera de dar conocimiento basado en estudios del comportamiento humano tomando en consideración las transformaciones del ambiente en el que se desenvuelve (Moreno & Moreno, 2002).

Passalacqua y Christensen (Christensen et al., 2014) consideran que la antropología consiste de cuatro subdisciplinas, la antropología cultural, antropología lingüística, arqueología y antropología biológica.

Passalacqua define a la antropología cultural como el estudio de la cultura humana y sus variaciones, donde se incluye de igual manera el análisis de los aspectos de la organización social, economía, política y religión. La antropología lingüística se encarga del estudio de la comunicación humana, aunado a como esta puede llegar a afectar la cultura y el comportamiento del hombre que se desarrolla en esta sociedad. Por su parte, la arqueología es el estudio de las culturas pasadas a través de artefactos o materiales que fueron dejados atrás y estudiados posteriormente.

Finalmente, la antropología biológica es la rama de la antropología que se encarga del estudio de la evolución, la filogenia y la variabilidad biológica de los primates, en especial el ser humano (Christensen et al., 2014), actuando así en el estudio comparativo de los primates con los seres humanos tanto en variación anatómica como su comportamiento, y por otro lado en la prospección, recuperación y análisis de los restos humanos dando respuesta a diversas cuestiones, como lo son la determinación de un perfil biológico, en especial sexo, edad, estatura y ancestría, entre otros marcadores (Tiol-Carrillo & González-Rodríguez, 2018).

Los bioantropólogos posteriormente se pueden llegar a especializar en diferentes áreas, como pueden ser la morfología funcional, bioarqueología, paleopatología y antropología forense (Christenssen et al., 2014).

La antropología forense surge de la antropología biológica, usando sus métodos para coadyuvar en la procuración de justicia, siendo que puede ser definida como la rama de la antropología biológica que trata la identificación de restos esqueléticos humanos o posiblemente humanos con fines forense (Moreno & Moreno, 2002). Estudiando no solo los huesos, sino que también analiza el contexto físico y forense en el que se encontraron dichos elementos óseos (Dirkmaat, Cabo, Ousley, & Symes, 2008).

La antropología forense trata de dar una identidad a los individuos que no pueden ser identificados a través de los tejidos blandos del cuerpo, siendo que usualmente usan osamentas o PFSI en estado de reducción esquelética, para determinar si se trata de individuos humanos, su edad, sexo, altura, ancestría, etc. (Houck & Siegel, 2010). Sin embargo, esta disciplina no se enfoca únicamente en la muerte, ya que cada vez es más común solicitar expertos antropólogos para estimación de edad e identificación de sujetos vivos (Cattaneo, 2007).

Finalmente, los antropólogos forenses, en coadyuvancia de arqueólogos, criminalistas y científicos forenses, también se especializan en la búsqueda y recuperación de restos humanos en estado de reducción esquelética, análisis de traumas esqueléticos y otras alteraciones que puedan ayudar a individualizar a una persona que se desconoce su identidad.

Odontología Forense

El estudio de los dientes se denomina Odontología, que se define como la ciencia que se encarga de estudiar la configuración morfológica de la cavidad bucal, tanto en situación de salud como enfermedad (Reddy et al., 2016).

La odontología aplicada a la procuración de justicia se conoce como odontología forense, que en un sentido más amplio es definido como la intervención de la odontología en un proceso de justicia tomando como base las evidencias que el sistema estomatognático pueda ofrecer (Moreno & Moreno, 2002). La odontología forense tiene como principal tarea el manejo, examen y evaluación de los registros dentales relevantes para la procuración de justicia.

La Odontología empezó a tomar parte en la procuración de justicia después del desastre del Bazar de la Caridad ocurrido en París en 1897, en el cual se reportó por primera vez la intervención de un odontólogo para ayudar a la identificación forense. Siendo el Dr. Óscar Amoedo, considerado padre de la Odontología Forense, quien identificó a 30 personas sin vida por medios odontológicos (Moreno & Moreno, 2002).

Casi 100 años más tarde, en 1976, se estableció la Junta Americana de Odontología Forense, quienes se encargaban de revisar metodologías odontológicas aplicables a la ciencia forense, es así como la odontología forense fue tomando cada vez más relevancia en el actuar de la justicia. En la actualidad se encarga de cubrir tres áreas básicas (Reddy et al., 2016):

1. Identificación de personas fallecidas donde no es posible identificarla por reconocimiento visual con tejidos blandos.
2. Ayuda legal relacionada con las malas prácticas de los odontólogos, en México esto se conoce como odontología legal.
3. Investigación de procedimientos criminales, siendo que se enfoca principalmente en la evaluación de huellas de mordedura y lesiones en las arcadas ocasionadas por abuso.

Por ello en la actualidad los odontólogos forenses juegan un papel importante en la identificación y estimación de edad, siendo que los órganos dentales pueden contener

información relevante para llegar a la identidad de una persona (Tirol-Carrillo & González-Rodríguez, 2018).

Aunado a lo anterior, la odontología tiene una gran ventaja sobre otras ciencias forenses. Su empleo es económico comparado con el ADN (Dirkmaat et al., 2008), da resultados rápidos, y los dientes poseen propiedades que hacen que tengan gran resistencia a altas temperaturas y agentes destructores, esto debido a que las coronas de los dientes están recubiertas de uno de los tejidos más resistentes en el cuerpo humano, el esmalte (Houck & Siegel, 2010).

Por lo anterior, el estudio de los dientes ha ganado fortaleza en el área forense, demostrando su necesidad en los peritajes y en la resolución de conflictos de interés legal, en especial en la identificación de personas, un tema muy importante en el contexto actual en México.

Identificación humana en el ámbito forense.

Según la Real Academia de la Lengua Española la identidad es el conjunto de rasgos propios de un individuo o colectivo que lo caracterizan frente a los demás. Con base en esto, podríamos decir que la identificación tiene como propósito establecer de manera inequívoca la identidad de una persona, dejándonos con la certeza de que los datos examinados le pertenecen a ese y solamente a ese individuo (Houck & Siegel, 2010).

La identificación consiste en el proceso de revisar los rasgos o conjunto de características de una persona que lo diferencien de los demás y hacen que sea ella misma (Calabuig & Villanueva, 2004), este proceso puede ser visual o mediante alguna técnica específica.

Uno de los métodos de identificación en auge es conocido como la identificación biométrica que surge con la idea de que hay ciertas características biológicas que son singulares e inalterables (Fernando & Correa, 2009). La identificación biométrica permite el reconocimiento automático de una persona usando las características de su cuerpo, para ello se compara con su identidad inscrita previamente almacenada (Areitio Bertolín & Areitio Bertolín, 2007). Este tipo de sistemas son usados en los aparatos electrónicos celulares,

bancos, edificios de gobierno, entre otros. Algunos ejemplos de identificación por biometría son mediante la huella dactilar, rostro, el patrón del iris o retina, la forma de firmar, registro de voz, entre otros; métodos que también pueden ser usados en el ámbito forense.

Se podría decir que la identificación biométrica es uno de los primeros acercamientos a la identificación que posteriormente se pueden trasladar al área forense, sin embargo entre ambos existen algunas diferencias. La identificación forense se da después de que ocurrió un hecho presuntamente delictuoso y se le exige un valor estadístico mayor dado que un falso positivo es un caso totalmente indeseable, mientras que la biométrica suele darse previo a un suceso y un resultado inconcluso o negativo es totalmente esperado (Jain & Ross, 2015).

En este orden de ideas, y poniendo énfasis a la identificación forense como se conoce comúnmente, esta surge con el fin de averiguar la identidad de vivos y muertos, siendo que los primeros métodos surgieron con la intención de diferenciar a los criminales. Alphonse Bertillon, en 1879, ideó una metodología para identificar a los prisioneros de la cárcel donde trabajaba, así nació la antropometría criminal, que estaba basada en una serie de medidas del cuerpo humano para identificarlo, con la idea de que dicha combinación de valores sería irrepetible dentro de la prisión. Además, se le tomaban fotografías a dichos presos, en norma lateral y frontal, con la intención de tener más registros para identificarlos. En 1894, Bertillon agregó las huellas dactilares a las fichas de estos presos, con la intención de darle mayor certeza a la identificación de los mismos (Ruiz-Garzón, 2013).

La ciencia continuó avanzando, llegando a 1984 cuando Alec Jeffreys haría uno de los descubrimientos más importantes que llegaría a revolucionar la identificación, desarrollando un método para vislumbrar la huella genética lo que permite darle un valor único a cada individuo. Desde aquella época las técnicas de análisis de ADN evolucionan, siendo que hoy en día se considera una de las técnicas más confiables y que presenta mayor exactitud (Barraza, 2016).

Estas técnicas, aunque surgieron con otras intenciones, han revolucionado la ciencia forense dándole forma a lo que hoy conocemos como identificación forense. La identificación forense se sustenta primordialmente de la comparación entre la información conocida y la obtención de datos en el examen, en muchas ocasiones suele ser *antemortem*

con la *postmortem*, es decir de la información conocida de la víctima previa a la muerte, aunada a los resultados que arroje el examen de la persona.

La información conocida se sustrae en muchas ocasiones de los archivos policiales, denuncias, bases de datos e información médica y dental que los familiares ponen a disposición para ayudar a esta tarea (Calabuig & Villanueva, 2004); inclusive se puede llegar a hacer uso de los modelos odontológicos que se puedan tener del paciente debido a los datos de la anatomía dental que puedan llegar a presentar (García Castillo & Álvarez Cárdenas, 2016).

Mientras que la información con la que se compara es obtenida mediante el examen y descripción de estructuras, realizado por los peritos en la persona que se desconoce su identidad, que puede estar con vida o no (Houck & Siegel, 2010). Dos elementos generales de cualquier disciplina forense son el examen visual general y la descripción del elemento a estudiar, el primero de ellos se realiza sin necesidad de aparatos y nos puede dar información valiosa para el proceder del perito, por otro lado la descripción de los elementos se ha tecnificado mediante la toma de fotografías del mismo. Llegado a esta parte se puede hacer uso de cualquier técnica complementaria que se considera pertinente, como modelos, radiografías, entre otras (Calabuig & Villanueva, 2004).

La identificación forense puede resumirse básicamente en tres casos (Calabuig & Villanueva, 2004):

- Sujetos vivos: este tipo de identificación se da cuando se compara la información previa de un sujeto con la del examen directamente en una persona viva que se desconoce su identidad; algunos ejemplos son el caso de desaparecidos, usurpaciones de la identidad, o personas con enfermedades como amnesia o alzheimer.
- Cadáveres recientes: también se compara la posible información *antemortem* con la que se cuenta, con el análisis *postmortem* realizado en una persona fallecida donde los tejidos aún están en conservación y por lo tanto se puede observar visualmente algunas de las características; un claro ejemplo son en los desastres masivos o eventos con saldo masivo de víctimas que hacen difícil el

reconocimiento de las víctimas. La fotoidentificación o el registro de tatuajes son elementos que comunmente se emplean.

- Restos cadavéricos en estado de reducción esquelética: en este caso las condiciones ambientales y el tiempo ocasionaron que se perdiera todo o casi todo el tejido del cuerpo; un ejemplo muy común son los restos en putrefacción avanzada o estado de esqueletización encontrados en enterramientos o inhumaciones clandestinas.

Dado lo anterior, las formas de identificación se pueden dividir en dos grupos, las comparativas y las reconstructivas. Las formas comparativas, se basan en la confronta entre la información previa (*antemortem*), o antecedentes del caso, con los hallazgos que son derivados del examen realizado en el individuo de interés (*postmortem*). Por su parte, las formas reconstructivas se derivan de las condiciones en las que se encuentra la persona, y debido a que estas no son favorables se usan métodos para tratar de reconstruir características que pudieran llegar a identificarlo (Barraza, 2016).

Los resultados de la confronta pueden generar cuatro posibles escenarios, identificación positiva, posible identificación, evidencia insuficiente para identificación y exclusión (Christenssen et al., 2014). La identificación positiva se da cuando los elementos son suficientemente distintivos para dar solo un resultado que no muestre mayor diferencia entre los datos *ante* y *postmortem*. Otro caso es una posible identificación, este escenario se da cuando existen características comunes entre los datos, pero no los suficientes para establecer una identificación positiva.

Por su parte, el escenario de la evidencia insuficiente por identificación sucede cuando la evidencia no es lo suficientemente completa para apoyar la comparación para una identificación definitiva y dar un resultado conclusivo. Finalmente, la exclusión es un escenario que ocurre cuando existen discrepancias inexplicables entre los datos *ante* y *postmortem* (Reddy et al., 2016).

La identificación forense suele dividirse en dos grupos, identificación fehaciente e identificación indiciaria (Quesada García & López Palafox, 2019). La identificación fehaciente es aquella que da certeza de la identidad, considerándose positiva cuando se

encuentra coincidencia entre los datos previos con los resultados del examen, en este grupo entra la dactiloscopia, odontología y genética.

Por su parte la identificación indiciaria se da cuando no existe un grado de certeza ni se puede dar una identidad completa de una persona, si bien no da una identificación completa suele ser de ayuda para confirmar los resultados obtenidos por los métodos fehacientes. Algunas ciencias y disciplinas que entran en esta categoría son la antropología forense, biología, toxicología y documentoscopia (Barraza, 2016).

Arcadas dentales como medios de identificación humana en la ciencia forense

Las arcadas dentales son un sistema bastante complejo de estudio, ya que la boca es un objeto de estudio con múltiples variables que pueden llegar a dificultar la identificación forense. Por ello, la mejor aproximación es mediante una identificación comparativa, donde se obtienen resultados que nos permiten observar similitudes o discrepancias entre las arcadas que se comparan, llegando así a una posible identificación positiva (Calabuig & Villanueva, 2004).

Las arcadas dentales usadas para la identificación de un individuo no es algo nuevo en el área pericial, ha ido evolucionando hasta lo que conocemos en la actualidad, usando una comparación metódica y sistemática de cada diente o estructura dental con el fin de contrastar la información *postmortem* del examen dental con la posible información *antemortem* con la que se cuenta (Houck & Siegel, 2010).

La identificación dental siempre se ha basado en la idea de que los dientes de las personas varían en número, tamaño y posición, aunado a los diferentes tratamientos que cada individuo recibe; es por ello que sería improbable que dos personas tuvieran exactamente las mismas características (Calabuig & Villanueva, 2004) aún en gemelos monocigóticos.

Sin embargo, desde el siglo 20 han surgido ciertas dudas acerca de las periciales en las cuales se asume la individualidad de las arcadas están bien sustentadas científicamente (Bush et al., 2011b), dado que no se ha podido comprobar el factor único en ellas (Community Committee on Identifying the Needs of the Forensic Sciences, 2009), por lo que deben hacerse esfuerzos para establecer el nivel de singularidad de esta estructura.

La teoría de los factores únicos de las arcadas se puede dividir en dos ramas, la primera de ellas está basada en el ideal de usar la individualidad como medio de confronta con una huella de mordedura identificando así al originario de la misma con la teoría de que ese patrón corresponde a una única persona, sin tomar en cuenta que la piel no es un sustento rígido para retener las características completas de una arcada debido a la elasticidad de la dermis (Verma, Kumar, & Bhattacharya, 2013).

Aunado a que una huella de mordedura en ocasiones presenta múltiples lesiones que pueden crear confusión en el análisis, siendo que una mordedura llega a adoptar múltiples formas debido a que las arcadas son un elemento móvil cuyas lesiones que producen pueden variar dependiendo de la dinámica (Calabuig & Villanueva, 2004).

La segunda de estas ramas es la concepción de usar las arcadas para realizar una identificación comparativa, es decir confrontar un modelo o registro dental directamente con la persona o PFSI dándole así una identidad inequívoca, con la idea de que dicha disposición es singular y solo le pertenece a esa persona (Madi & Swadi, 2013).

Arcadas en la huella de mordedura

Anteriormente mencionado, en los servicios periciales se toman los modelos de arcadas dentales con la única la finalidad de encontrar al originario de la mordida en un hecho presuntamente delictivo, confrontándolo así con el patrón que queda marcado en la piel del agraviado.

Por ello una mordida puede ser entendida como un patrón que es producido por la dentición de un humano, o animal, y de sus estructuras anexas (Clark et al., 1991); dicho patrón tiene que ser impreso en una superficie que deje ver alguna de las características de las estructuras de la arcada.

Comúnmente, el análisis comparativo de las huellas de mordida se emplea en casos de naturaleza violenta, como suelen ser homicidio, abuso infantil, violaciones, entre otros (Vale & Noguchi, 1983); y dichas marcas pueden llegar a ser ocasionadas tanto por el agresor, a manera lasciva de herir al perjudicado, o por la víctima, como una manera de defenderse de su atacante (Furness, 1981).

Dada la naturaleza agresiva que representa una huella de mordedura los casos con mayor incidencia en los cuales se requiere usar la comparación de dichas marcas son en mordeduras en el cuerpo de la víctima, siendo que son ocasionados mayoritariamente en delitos de orden sexual (Calabuig & Villanueva, 2004). En estos tipos de delitos, es frecuente encontrar marcas de mordida en pechos, cuello y mejillas (Verma, K., Joshi, B. & Joshi, 2013).

El estudio de las huellas de mordida data desde los juicios de Salem en el año 1692. En este juicio en particular el acusado era un hombre de mediana edad llamado Burroughs, quien solía morder a sus víctimas previas a matarlas y a quienes presuntamente intentaba convencerlas de realizar brujería, por lo que la corte comparo sus arcadas dentales con el patrón marcado en la piel de estas mujeres. Esta última acción se convirtió en un precedente, siendo las primeras marcas de mordidas que fueron admitidas en un juicio público (Verma, K., Joshi, B. & Joshi, 2013).

No obstante, fue hasta 1924 cuando la ciencia y el derecho empezaron a considerar el análisis de huellas de mordedura como una herramienta de identificación comparativa con validez científica y útil en un juicio. Siendo que el investigador Sorup desarrollo una técnica en la cual hacia uso de papel transparente con las marcas dentales del sospechoso, las cuales posteriormente confrontaba con fotografías tamaño real de la huella de mordedura dejada en el cuerpo de la víctima (Ström, 1963).

No es de sorprenderse que esta metodología fuera empleada para ayudar a acusar a uno de los asesinos más famosos de Estados Unidos, Ted Bundy. Ted fue llevado a la justicia en parte por las huellas de mordedura *postmortem* que le ocasiono a su última víctima. El odontólogo forense, Lowell Levine, testificó acerca de la coincidencia entre las arcadas de Ted y la huella de mordedura encontrada (Houck & Siegel, 2010).

La ciencia siguió avanzando, hasta que estudios posteriores demuestran que la mejor manera de confronta de los patrones de huella de mordedura y la arcada dental es mediante una metodología que incluya un escáner 3D, generando así un modelo digital para la comparación (D Sweet & Bowers, 1998).

En la actualidad, en México, la confronta de huellas de mordedura esta descrita como una pericial a realizar en la Guía de Especialidades Forenses de la Procuraduría General de

la República, sugiriendo que es obligación del perito tomar la fijación fotográfica de las mordidas encontradas en el cuerpo de la víctima con la intención de realizar una comparación posterior e identificar el origen de las mismas (PGR, 2015).

Dicho estudio se basa en la idea de que la arcada dental es única en cada individuo y que la piel es un sustento lo suficientemente rígido para conservar sus características, siendo así que al ser una metodología antigua es también una técnica muy estudiada y en ciertos casos rebatida. Por ello, en 1986, la junta Americana de Odontología Forense (*American Board of Forensic Odontology, ABFO*) revisó todos los métodos existentes en el momento, tratando de estandarizar la manera en que se realiza la confronta de huellas de mordedura, no obstante el debate aún continúa para determinar si es un método confiable y verídico (*American Board of Forensic Odontology, 1986*)

La metodología recomendada por el ABFO consiste en un análisis de huellas a través de fotografías y moldes, los moldes tomados del sospechoso, para una posterior confronta entre la fotografía a tamaño real con las arcadas, realizando un análisis métrico y comparación de los patrones encontrados (*Calabuig & Villanueva, 2004*).

Arcadas en la identificación comparativa

Existen muchos estudios que comparan la individualidad de la arcada dental con la de las huellas digitales e inclusive con la del ADN, dado que se presume que cada sujeto tiene características únicas que le dan su factor particular, tales como las distancias y ángulos entre los dientes, el caso de que haya dientes ausentes, trabajos dentales de restauración o estéticos, entre otros (*Verma et al., 2013*).

La identificación mediante el uso de los dientes puede ser rastreada hasta el año 66 D. C., donde la historia cuenta que la madre Agrippina ordenó a sus soldados matar a Lolía Paulina. Los soldados regresaron con la cabeza de Paulina desfigurada, por lo que Agrippina le abrió la boca y con ello pudo identificarla gracias a los dientes “descoloridos” característicos de Lolía.

Los siglos pasaron, llegando a la guerra civil de los Estados Unidos, donde Paul Revere ayudaba a identificar los cuerpos sin vida de los soldados desfigurados en batalla.

Dicha identificación era realizada comparando los dientes de los fallecidos con los registros dentales que el ejército guardaba de todos sus soldados en combate (Verma, K., Joshi, B. & Joshi, 2013).

La historia continúa y es bien conocido que dichos métodos han ayudado a la identificación de víctimas de la segunda guerra mundial, en la identificación *postmortem* de Adolf Hitler, e inclusive fueron usados en la identificación de víctimas de la masacre del 11 de septiembre (Verma et al., 2013).

Ya en la actualidad, se ha estudiado la identificación dental en múltiples poblaciones poniendo principal interés en si existe dimorfismo sexual en los dientes o si se presentan factores únicos entre los sujetos. Un ejemplo son los estudios de Madi (Madi & Swadi, 2013), quien mediante una nomenclatura creada por su grupo de investigación realizó una especie de odontograma, lo que le permitió demostrar la individualidad dentro de su muestra internacional debido a que la particularidad de las características que estudiaba no se llegaron a repetir.

En los peritajes actuales en esta rama muchas veces solo se basan en la comparación visual entre el sujeto y un modelo dental, o en ocasiones puede llegar a usarse un calibrador vernier para realizar mediciones y compararlas posteriormente. Investigaciones sucesivas demuestran que quizá no sea la mejor aproximación al método, siendo que el mayor error en las mediciones viene de realizarse manualmente con un calibrador (Muñoz-Muñoz & Perpiñán, 2010), por ello los *software* digitales han demostrado mejores resultados. Inclusive se debe considerar que los yesos odontológicos pueden llegar a tener una alteración en su escala, siendo el promedio máximo de 0.1 mm (Hunter & Priest, 1960; Kumar et al., 2015).

Ventajas del uso de las arcadas dentales sobre otros métodos

Es evidente que no se espera que la identificación con arcadas dentales llegue a sustituir otros métodos de identificación, en especial aquellos que han demostrado su gran nivel de precisión como lo es el perfil genético, por el contrario la corroboración de pruebas de identificación humana es la prioridad y dará más certidumbre a jueces y familiares sobre el proceso realizado. Ahora bien, las características particulares de los dientes sobre otros

tejidos pueden llegar a ser una ventaja en los casos donde el resto de las técnicas no puedan ser empleadas.

Estos casos particulares se suscitan cuando el Intervalo Post Mortem es amplio, cuando las variables destructivas dejaron el cuerpo de la PFSI imposible de reconocer de manera visual o se perjudicaron las condiciones para la toma de muestra genética o lofoscópica, por lo tanto, los resultados que se esperarían de dichas especialidades serían poco confiables. Luego entonces, la ventaja antes mencionada de las arcadas dentales en estos casos se deriva de los estudios donde se demuestran que los dientes son altamente resistentes a la destrucción y descomposición cadavérica (White et al., 2012), como muchos ejemplos de restos calcinados han podido demostrar.

Posturas ante la individualidad de las arcadas

Como se ha visto, las técnicas previas han rondado el mundo forense desde hace ya algunos años, ambas con base en la teoría de la individualidad de las arcadas. No obstante aún faltan análisis científicos para corroborar la confiabilidad, precisión y estandarización de dichos métodos. En especial en la época actual con la transición al sistema de justicia penal acusatorio en México.

Siendo así que en el sistema de justicia penal acusatorio en México se le da cada vez más peso a los testigos expertos y al desahogo de sus dictámenes en juicio para poder llegar a la verdad jurídica del caso. Es por lo anterior, que los peritos en campo tienen que actualizarse en los métodos que se están descubriendo periódicamente, aquellos que se han ido modificando o las técnicas que se han desechado por falta de validez científica. Siendo así que un experto forense no solo tiene que saber cómo aplicar un método, y las limitaciones del mismo, sino que debe conocer el sustento científico que le da validez a su actuar.

En el tema en cuestión, que es la individualidad de las arcadas dentales, los científicos se han dividido en dos posturas contundentes que han llevado a dar polémica a las periciales que se basan en esta teoría.

Por un lado están aquellos que apoyan la teoría del factor único en las arcadas dentales, mientras que por el contrario se encuentran aquellos que consideran que no se puede llegar a tal conclusión.

Arcadas dentales como variable individualizadora: A favor

Aunque ya se mencionó que las arcadas dentales como medio de identificación datan desde hace ya muchos cientos de años atrás, fue hasta 1984 donde se empezaron a realizar estudios científicos para apoyar la teoría. En este orden de ideas Rawson (Rawson, Ommen, Kinard, Johnson, & Yfantis, 1984) fue uno de los primeros en apoyar dicha teoría, y por lo tanto de los más citados, quien realizó un estudio de huellas de mordedura donde aseguraba que la gran variedad en que se localizan y distribuyen los dientes en su muestra permitían llegar a concluir, con suficiente sustento estadístico, que la forma y tamaño de las arcadas dentales eran variables únicas para cada individuo.

En otra locación, se creía que lo que podía llegar a permitir la individualización de las arcadas eran las cualidades positivas y negativas que presentaran las mismas. Entendiéndose como cualidad positiva a aquella presencia de características que dotarán de un factor único a las arcadas, como por ejemplo la presencia de un diente con características únicas. Por su parte, las cualidades negativas eran la ausencia de cualidades que normalmente se presentaban, saliéndose de la norma, un ejemplo es la ausencia de un órgano dental (MacFarlane, MacDonald, & Sutherland, 1974).

Concordando con los anteriores, Kieser (Kieser et al., 2007) realizó una investigación donde expresa que los dientes anteriores mostraban particularidades, haciendo que cada sujeto de su estudio presentara características que lo hacían único y permitieron individualizarlos. En su trabajo usó un método de morfometría geométrica donde los *semilandmarks* permitían dimensionar los órganos dentales capturando así contornos y formas que no serían posibles con un método métrico común.

Su trabajo arrojó como resultado que el tamaño y la forma de las superficies incisales de los órganos dentales anteriores, así como las características de la arcada dental relacionadas con dichas superficies, permitieron aumentar el éxito en la manera de individualizar a los sujetos de estudio. Sin embargo, este método no le permitió realizar una

estimación sexual, con lo cual se puede decir que las superficies incisales de los dientes anteriores no presentan un dimorfismo sexual, para esa muestra y con este método. Una de las principales críticas de este trabajo es que su muestra era muy pequeña y por lo tanto los resultados pudieron estar sesgados (Thevissen, Willems, Bekkering, Franco, & Souza, 2014).

En el 2010, se realizó un estudio (Muñoz Barrio, Gómez García, Calvo Guirao, & Luna Maldonado, 2011) para observar si los ángulos formados por los dientes anteriores permitían identificar el causante de una huella de mordedura, con la idea de que los ángulos y distancias marcados en dicha mordida solo podían ser correspondientes con una arcada de la muestra. Lograron alcanzar un grado de coincidencia del 95%, apreciándose solamente ligeras diferencias en los incisivos laterales. Esto apoya la teoría de la individualidad con la diferencia que se hace uso de ejes hipotéticos.

Arcadas dentales como variable individualizadora: En contra

De la misma forma existen varios detractores de dicha teoría, afirmando que la arcada dental no tiene la varianza suficiente para considerarse única en cada sujeto. Muchos de ellos han visualizado los trabajos de sus pares y han encontrado errores metodológicos o conclusiones apresuradas.

Por ello en 2009 la Academia Estadounidense de Ciencia Forense consideró que no existían pruebas científicas suficientes para considerar que cada arcada dental es única, ya que se creía que para ese momento no había estudios con el rigor científico adecuado que probaran esa teoría (Bush et al., 2011a). Si bien esta aseveración surge con base en el análisis de las huellas de mordedura, técnica que no será analizada en este estudio, hace referencia a que para ese año aún no se podía demostrar que la disposición de la dentición humana fuera un factor particular para cada individuo.

Aunado a la Academia, en el tratado de Cole (Cole, 2009) y en los escritos de Saks (Saks & Koehler, 2008) llegan a una conclusión bastante similar. Ambos aseveran que el factor único de las arcadas dentales es insostenible científicamente, incapturable, una mera abstracción e inclusive sostienen que estas no pueden estar dotados de características descriptivas e individualizantes; lo que se traduce a que la variable de individualidad de las arcadas por su forma no puede existir en esta estructura.

Sin embargo, aseveran que aunque fuera posible en un futuro determinar la individualización de las arcadas dentales no se está exento de que llegarían a existir errores en la identificación de dos individuos con características dentales similares (mimetismo). Siendo que no cierran del todo la puerta a esta teoría, pero con esta afirmación exigen que se hagan estudios con calidad para confiar en los resultados obtenidos.

Por su parte, Bush (Bush et al., 2011a) refuta directamente a Rawson, uno de los principales pilares de la teoría a favor de que las arcadas dentales son únicas. Bush menciona que en el estudio de Rawson no menciona ninguna coincidencia entre los mismos individuos, ni tampoco si hay similitudes entre ellos. Lo anterior con la intención de buscar patrones de dentición que se puedan llegar a repetir en diferentes individuos, ya que Rawson no consideró la correlación que existen entre los dientes ni mucho menos la distribución uniforme que las arcadas dentales pueden llegar a presentar.

Con base en ello Bush considera que no se puede hablar de las arcadas dentales como variables únicas e individuales en cada persona, siendo que a lo máximo que se podría llegar es a generar patrones de igualdad, es decir que un grupo de individuos comparten la misma forma de arcada con lo cual es posible generar una clasificación de los tipos de forma de arcada dental.

Concordando con los anteriores exponentes, Sheets (Sheets, Bush, & Bush, 2013) realiza un estudio en escaneos de superficie de arcadas donde observa que la variable que más afecta en la variación de esta estructura es la anchura de las mismas, no obstante considera que se debe tener una aproximación cuidadosa con la hipótesis de que las arcadas dentales son individualizantes ya que no se cuenta aún con evidencia o investigaciones científicas para considerarlo una teoría factible. En su estudio expone que entre mayor sea la base de datos estudiada, se aumenta ligeramente la posibilidad de encontrar una coincidencia entre los individuos analizados. No obstante, encontró que realizando una superposición de análisis de Procrustes se permite aumentar la varianza entre las mediciones efectuadas, explicado por las diminutas diferencias en la forma de las arcadas. Siendo que según su estudio, la mandíbula es la estructura con mayor varianza.

A pesar del debate expuesto en las últimas páginas, entre los que se encuentran a favor y en contra de la teoría planteada, actualmente las arcadas dentales siguen siendo empleadas en los servicios periciales para la confronta de huellas de mordedura.

Morfometría geométrica

El procedimiento que se pondrá a prueba en este proyecto es el implementado por Kieser en el año 2007, el cual está basado en los métodos de la morfometría geométrica usando la estadística multivariada para analizar los datos, enfocándose en la variable forma y tamaño (Torcida & Pérez, 2012).

En pocas palabras, la morfometría geométrica es un método que permite un análisis cuantitativo de la forma, capturando la geometría de las estructuras morfológicas de interés y preservando la información de forma a través del análisis estadístico (Sheets et al., 2013).

Sin embargo, la morfometría geométrica no fue la primera herramienta que se usó para intentar analizar dichas variables, en realidad el estudio de las formas en los seres vivos ronda desde la época de Darwin. Darwin, en 1859, tomó la tarea de describir diferencias anatómicas y morfológicas entre los taxones (D C Adams, Rohlf, & Dennis, 2013), esto con la intención de describir biológicamente las especies que estudiaba.

Al inicio, las comparaciones realizadas por Darwin y otros científicos eran con base en formas que se podían reconocer fácilmente, como pudieran llegar a ser círculos, rectas, entre otras (Zelditch, Swiderski, Sheets, & Fink, 2004), no obstante la ciencia siguió evolucionando y mejores métodos fueron encontrados.

Los científicos continuaron intentado buscar nuevos métodos para analizar la forma, coincidentemente ocurrió que en el siglo XX se dio una transición importante en la biología por lo que ahora se le daba más importancia a los estudios con datos cuantitativos (Dean C Adams, James Rohlf, & Slice, 2004).

Es con esta transición que se originó lo que hoy se conoce como morfometría tradicional, la cual puede ser definida como el estudio cuantitativo de la variación de las formas biológicas (Bookstein, 1996). No obstante, la morfometría tradicional presentaba un problema que la hacía difícil de usar, ya que arrojaba una serie de coeficientes y gráficas que

complicaban su interpretación, por lo tanto no cualquiera podía hacer uso de dicha metodología (Dean C Adams et al., 2004).

Además de que una de sus principales críticas era que el uso de distancias, ángulos, curvas, radios o índices implica que se pierda información relevante de la forma biológica, careciendo de exactitud y precisión en la descripción de la misma debido a que usa variables sin una relación anatómico-funcional, y las mismas distancias o ángulos pueden representar formas distintas (Richtsmeier, DeLeon, & Lele, 2002).

Debido a esta problemática se continuaron buscando formas de describir la forma biológica de las especies, y así se llegó a lo que en la actualidad se llama morfometría geométrica. Dicho cambio se volvió una transición de paradigma, ya que los fundamentos teóricos y metodologías tuvieron que actualizarse. La morfometría geométrica puede ser considerada como una fusión dialéctica de la geometría con la biología (Bookstein, 1996).

Al igual que la morfometría tradicional, la geométrica analiza la forma de los organismos, pero en el caso de la última considera el espacio geométrico del objeto, aunado a que emplea métodos estadísticos multivariados más sencillos para analizar la información y además la interfaz de los programas que analizan este tipo de datos es bastante amigable haciendo sencillo reconstruir la forma con la información recopilada. Dando como resultado un análisis directo de la forma sin tener que dar una interpretación complicada, y que además tiene una mayor precisión biológica en el estudio de la variación fenotípica (Quinto, Farrera, Gil, & Gómez, 2017).

En este tipo de técnicas hay ciertas variables que son de importancia para comprender la manera en que se emplean dichos métodos, estas son la forma y el tamaño. La forma (*shape*) es definida, en este método, como toda la información geométrica que posee el objeto y que tiende a persistir una vez que se le ha despojado de otras variables como son la localización, escala y efectos rotatorios del mismo objeto (Klingenberg, 2010), la forma es detectada a través de las coordenadas cartesianas en las que se colocan los puntos a analizar en el proyecto.

Por su parte, la escala, que también puede ser llamada tamaño del centroide, es definida como la raíz cuadrada de la suma de las distancias cuadradas, las cuales son provenientes de cada punto hacia el centroide configurado previamente (Kieser et al., 2007).

Ya conociendo las variables, no es sencillo analizar separadamente la forma del tamaño debido a que son características biológicas que suelen estar íntimamente ligadas (Zelditch et al., 2004). Por ello todo protocolo a usar en morfometría geométrica tiene que considerar ambas variables en todo momento.

Cualquier procedimiento que se fundamente en los principios originados de la morfometría geométrica se puede resumir en unos cuantos pasos. El primero de ellos es analizar la forma de un organismo capturando su estructura, lo cual se realiza a partir de una imagen, ya sea 2D o 3D, colocando las coordenadas cartesianas a manera de *landmarks*. Estas coordenadas ayudan a calcular el tamaño del centroide, dato relevante para posteriormente realizar un análisis de *Procrustes*. Finalmente, con los datos arrojados del análisis se procede a realizar la estadística multivariada, la cual puede llegar a ser un Análisis de Componentes Principales, Regresiones, entre otras (Torcida & Pérez, 2012).

Landmarks

Como ya se explicó previamente, el primer paso en todo protocolo de morfometría geométrica consiste en la colocación de las coordenadas o *landmarks* sobre la estructura a la cual se le quiere analizar la forma. Para ello se debe entender a un *landmark* como un *loci* anatómico que no altera su posición con respecto a otros, ya que pueden ser ubicados de manera fácil y en repetidas ocasiones aunque se cambie el individuo, la figura sea rotada o cambie en sus dimensiones (Zelditch et al., 2004).

Una manera más sencilla de definir los *landmarks* sería como un punto en un espacio 2D o 3D que corresponde a la posición de un rasgo en particular (Bookstein, 1996). Dichos puntos tienen que poder ser identificados con precisión y en todas las ocasiones que se haga la medición, siempre ubicables en un mismo plano.

Los *landmarks* deben ser elegidos con el propósito de cubrir la totalidad de la estructura que se está analizando, siempre procurando que se tenga la mayor precisión anatómica para capturar de la mejor manera la forma real del objeto. De la misma manera, al elegir los *landmarks* se debe considerar que el protocolo no cuente con un número de puntos excesivos o que estos sean demasiado ambiguos y con ello no permita la reproducibilidad del método (Klingenberg, 2010).

Los *landmarks* pueden ser divididos en tres tipos, tipología propuesta por Bookstein en 1991 y que cinco años más tarde él mismo revisó e hizo unas ligeras correcciones. Estos tres tipos de landmarks son:

- **Tipo I:** Son aquellas coordenadas colocadas en puntos que cuentan con una evidencia biológica de su presencia en todos los individuos. Algunos ejemplos pueden ser un foramen o el punto donde se unen de dos a más suturas.
- **Tipo II:** Son puntos donde la homología se sostiene meramente con evidencia geométrica, como puede llegar a ser el punto máximo de una curvatura.
- **Tipo III:** se trata de *landmarks* que tienen al menos una coordenada ambigua, es decir no hay mucho sustento biológico para la ubicación del mismo. Algunos ejemplos pueden ser el extremo de un diámetro o el punto más bajo de una concavidad. Debido a su naturaleza imprecisa, cuando Bookstein revisó su tipología renombró a este grupo como tipo III o *semilandmarks*

La combinación en el uso de múltiples *landmarks* tiene cierta ventaja sobre las distancias lineales que tradicionalmente se empleaban, ya que estas últimas en ocasiones no consiguen capturar toda la configuración espacial de la estructura en cuestión, un problema que se ha visto suele solucionar el uso de *landmarks* (Dean C Adams et al., 2004)

Aunado con que al ser colocados sobre un sistema de referencia cartesiano nos permite describir la forma a partir de coordenadas, las cuales pueden obtenerse a través de *software*, como *TpsDig*, o directamente sobre el espécimen de estudio con ayuda de digitalizadores especiales como el *Microscribe* (Quinto et al., 2017).

Análisis Generalizado de Procrustes (AGP)

Una de las principales diferencias entre la morfometría tradicional y la geométrica, es que esta última implementó el análisis generalizado de *Procrustes* en su metodología, ya que observó la eficacia del mismo para remover toda la información adicional a las variables de interés.

El nombre de dicho análisis viene de la mitología griega, y consiste en un conjunto de herramientas matemáticas que permiten comparar y ajustar dos conjuntos de *landmarks* provenientes de la misma estructura en dos individuos diferentes (Torcida & Pérez, 2012).

En términos sencillos el análisis de *Procrustes* consiste en aplicar una transformación euclidiana a los datos, esta transformación conserva la forma del objeto pero elimina las diferencias de escala, rotación y traslación en las mediciones realizadas (Figura 6). Con ello se llevan los datos a un punto estándar para poder ser trabajadas con técnicas de estadística multivariada (Goodall, 1991).

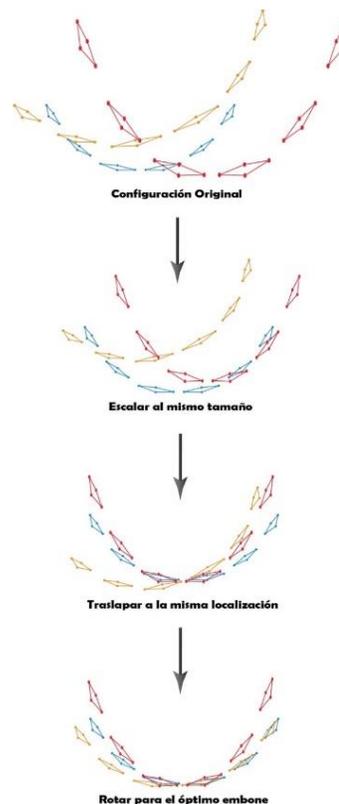


Figura 6. Representación gráfica del procedimiento de un análisis generalizado de *Procrustes*.

El análisis de Procrustes vino a modificar la manera de realizar estudios de análisis de la variación morfológica, dándole peso a la morfometría geométrica desde la implementación de dicho análisis, ganando gran relevancia en todas las ramas de la biología (Torcida & Pérez, 2012).

Tamaño del centroide (centroid size)

Mencionado previamente, la aplicación de los *landmarks* ayuda a calcular la ubicación del centroide (Figura 4). El centroide es un factor que permite definir la escala de un objeto en coordenadas cartesianas, y que puede ser definido como el centro de la figura, donde la distancia que existe de este a cada *landmark* es coincidente (Zelditch et al., 2004).

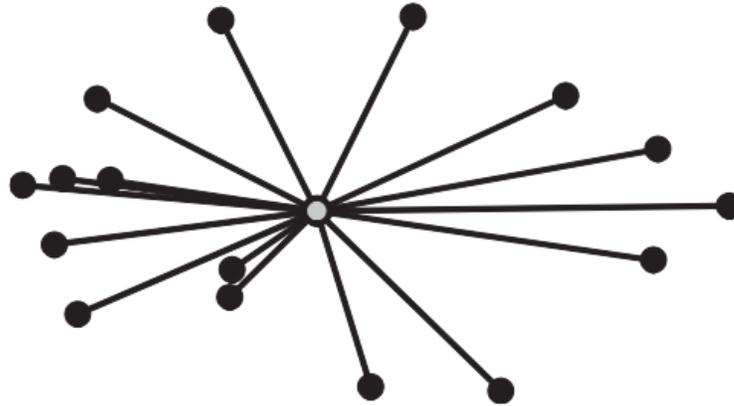


Figura 4. Representación visual del centroide de una piraña calculado con 16 *landmarks*, esquema extraído de Zelditch, 2004.

El tamaño del centroide (Figura 5), considerado también la escala geométrica, es especificado como la raíz cuadrada de la suma de las distancias cuadradas de todos los puntos capturados con respecto a su centro (Bookstein, 1996).

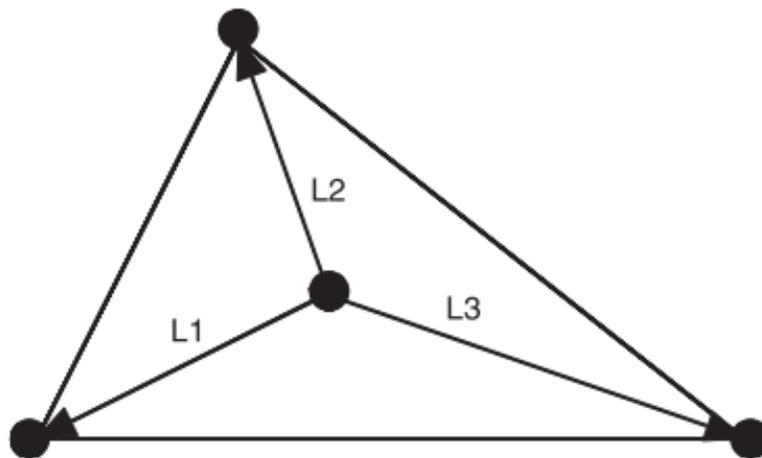


Figura 5. Representación visual del tamaño del centroide calculado con 3 *landmarks*, donde L1, L2 y L3 representan la distancia de los puntos al centroide. Esquema extraído de Zelditch, 2004.

El tamaño del centroide se encarga de definir el tamaño del objeto en cuestión, siendo la única variable que no se correlaciona matemáticamente con la forma, por consiguiente expresa muy bien la escala (Zelditch et al., 2004).

Error de medición

En la morfometría existe un problema muy común al que se puede enfrentar cualquier dato que este expuesto a una metodología de este tipo, el cual es conocido como error de medición. Este puede ser definido como la variación existente entre las mediciones de una misma característica particular en el mismo individuo, esta aseveración no incluye la variación individual existente entre los diferentes sujetos de la muestra de estudio (Bailey & Byrnes, 1990).

Los valores morfométricos son derivados de mediciones que tienden a variar en precisión, es decir que no tienen el parecido exacto a nivel cuantitativo entre cada repetición de las mediciones realizadas (Yezerinac, Loughheed, Handford, Biology, & Dec, 1992). Es por ello que el error de medición puede verse exacerbado por múltiples factores que pueden llegar a aumentar la variación entre las mediciones del mismo individuo (Arqvist & Martensson, 1998).

Se puede dividir en tres grupos los factores que pudieran llegar a afectar en un proyecto basado en la morfometría geométrica, el primero de ellos sería errores en la toma de modelos, errores en el muestreo o toma de datos y, finalmente, errores de digitalización (Arqvist & Martensson, 1998).

El primer grupo son los errores en la toma de modelos los cuales son debido a problemas en el inicio mismo del proceso. Para el caso específico de la odontología algunos ejemplos son los errores del operador encargado de tomar los modelos dentales directamente del paciente ya sea por falta de pericia o por alguna razón que pueda llegar a alterar sus habilidades, e inclusive los efectos o cambios en la dimensión entre la arcada original y el modelo tomado explicado por los materiales usados como son el alginato o el yeso.

El segundo grupo, son aquellos errores ocasionados al trasladar un modelo físico a un archivo digital, en este caso a través de fotografías o escaneado 3D. Estos pueden ser las

distorsiones ocasionadas por la lente de la cámara, por la mala toma de la fotografía, o por la falta de estandarización en la toma de la misma. O por otro lado pueden ser errores en el escáner digitalizador que alteren la magnitud del espécimen, e inclusive errores de mala toma de dichos escaneados.

Finalmente, el tercer grupo se evoca básicamente a los errores humanos en la aplicación del protocolo, es decir la mala colocación de los *landmarks* en el modelo, lo cual depende de la habilidad o experiencia del operador en la aplicación de dicho modelos, así como del conocimiento que posea para usar los *software* y programas empleados en el experimento.

De la misma manera puede ser fuente de error el hecho de realizar mediciones 2D en estructuras que originalmente sean 3D, que puede afectar la variación entre los procedimientos de medición (Muñoz-Muñoz & Perpiñán, 2010), siendo que no concordaran las varianzas por la falta de una dimensión en una de las mediciones.

Al momento de analizar los resultados, si no se toman en cuenta las posibles fuentes de error de medición se puede confundir los errores de digitalización con el efecto de mimetismo. El mimetismo puede ser definido como la posible coincidencia fenotípica entre dos individuos diferentes en una población determinada (Gibelli, De Angelis, Poppa, Sforza, & Cattaneo, 2017). Esto quiere decir que la varianza entre estos dos individuos es mínima y por lo tanto las estructuras son bastante parecidas.

El mimetismo puro puede representar un problema para individualizar un sujeto, pero en muchas ocasiones se trata simplemente de errores en la medición de las variables por lo que se debe de revisar aquellos individuos que presenten este fenómeno y descartar problemas en el protocolo.

Formas de disminuir el error de medición

El error de medición puede llegar a representar un problema bastante grande si no se toma en cuenta en los estudios, ya que aumenta la posibilidad de no encontrar varianza entre los grupos o encontrar mayor varianza, lo que llevaría a una estimación errónea (Yezerinac

et al., 1992). Siendo que no es debido a que la varianza no exista, sino que existen factores que meten ruido al modelo y que no se tomaron en cuenta.

Es por lo anterior que todo investigador debe considerar el error de medición y con ello maneras de intentar disminuirlo. Algunas de ellas son estar bajo las mismas condiciones al realizar las digitalizaciones, realizar una prueba de error y repetir las mediciones (Arnqvist & Martensson, 1998).

La primera de ellas se traduce a asegurarse que se use el mismo equipo en todas las digitalizaciones, siempre en las mismas condiciones que ya deberían estar estandarizadas. También ayuda que sea la misma persona quien realice los procesos para asegurar que siempre se siguen los mismos parámetros, en caso de no ser posible es necesaria la estandarización de la metodología empleada.

Siendo el caso de que siempre se trate de la misma persona se puede calcular el error intraobservador, es decir las variaciones entre las mediciones de un mismo individuo realizadas por un mismo observador, mientras que si se trata de varias persona se calcula el error interobservador, es decir la varianza entre las mediciones de un mismo individuo realizadas por diferentes observadores (Nadas, Putz, Kolev, Nagy, & Jermendy, 2008).

El segundo método que se puede emplear es realizar una prueba de error, que básicamente consiste en medir el error intraobservador en las mediciones realizadas. Existen múltiples métodos para calcular el mismo, uno de ellos es observando la varianza entre cada medición del mismo individuo y graficando dicha varianza.

Otra manera en que puede ser realizada dicha prueba de error es calculando las desviaciones absolutas de cada *landmark* a la media, posteriormente, se calcula el error de la media de las raíces cuadradas que existe entre las diferentes mediciones realizadas en el mismo grupo (Singleton, 2002).

Por último, para evitar el error de medición en protocolos aplicados a datos de morfometría geométrica se debe repetir las mediciones de cada espécimen, y realizar posteriormente el promedio estadístico de los valores de forma de cada uno, observando si existe apareamiento entre los mismos individuos en las diferentes mediciones (Arnqvist & Martensson, 1998).

Dichas repeticiones en la medición tienen que ser realizadas lo más independientemente posibles, ya que se ha comprobado que esto ayuda a reducir el error que puede ser originado por memorizar la posición de los *landmark*. Consecutivamente se calculan los centroides de cada repetición en la medición; siendo que por sí solas las repeticiones tienen menor peso estadístico en el porcentaje de error de medición, comparado con el aumentar el tamaño de la muestra a analizar incrementando así la varianza (Yezerinac et al., 1992).

La importancia de evaluar el error de medición se debe a que le da la certeza al investigador de que la variación analizada sea parte de la información biológica que arroja la estructura analizada y no de errores sistemáticos en la planeación del proyecto, así como al momento de llevarlo a cabo (Quinto et al., 2017).

METODOLOGÍA

Muestra de estudio

Dentro de la Colección Odontológica Nacional de Interés Forense del Laboratorio de Antropología y Odontología (LAOF) de la Licenciatura en Ciencia Forense de la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se resguardan modelos dentales de pacientes de la clínica de ortodoncia del Posgrado de la Facultad de Odontología de la UNAM. Los modelos dentales de yeso citados se tomaron como protocolo de atención odontológica previa y posterior al tratamiento, tanto en maxila como mandíbula.

A la fecha de realización de la presente tesis se contaban con 136 individuos, todos mexicanos, de los cuales 83 individuos son femeninos y 53 individuos son masculinos, con un rango de edad entre 9 a los 64 años.

Criterios de inclusión/exclusión

A continuación se describen los criterios de inclusión/exclusión del estudio:

1. Cada individuo incluido en el presente trabajo contó con modelos dentales superiores e inferiores
2. No debería tener alguna enfermedad que altere la morfología dental de manera severa (e.g. síndromes).
3. Contar con expediente clínico de donde se extrajo información relevante, como es el sexo y edad.
4. La ausencia de algún órgano dental no era factor de exclusión en vista de que dicha característica puede llegar a ser de relevancia como elemento individualizante.
5. Haber sido digitalizados en 2D y 3D mediante el protocolo de la Colección Odontológica Nacional de Interés Forense. En éste sentido se contaban con fotografías de 134 individuos y escaneos de superficie en 3D de 136 individuos (Tabla 1), de las cuales 5 individuos solo contaban con modelos pre-tratamiento, y solo un individuo contaba con 6 modelos tomados durante el tratamiento. Además, no se contaba con las fotografías de los modelos de dos de los individuos razón por la cual el número de sujetos analizados es mayor en 3D, siendo el individuo 22 y el 129. Sin embargo, el individuo 54 cuenta con 7 fotografías en total y solo un escaneo de superficie. Por su parte, en los modelos 3D no se contaban con todos los escaneos de

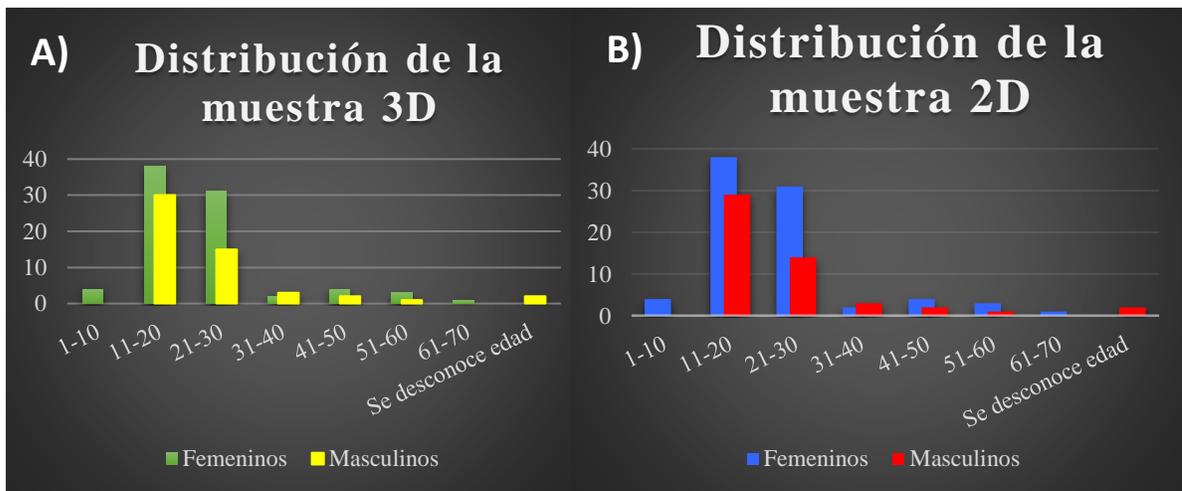
tres individuos, por lo que el número total de modelos escaneados es menor que el de fotografías tomadas. Dando un total de 526 fotografías utilizadas para la estimación de la individualización en 2D, mientras que para la estimación de individualización en 3D se tenía un total de 517 modelos digitalizados.

Solo en dos de los casos no se contaba con la edad de los individuos, sin embargo se tomaron en cuenta puesto que la edad no era una variable con gran peso a tomar en consideración en el proyecto.

Distribución de la muestra

3D				2D			
136 individuos (escaneos de superficie)				134 individuos (fotografías)			
83 femeninos		53 masculinos		83 femeninos		51 masculinos	
1-10	4	1-10	0	1-10	4	1-10	0
11-20	38	11-20	30	11-20	38	11-20	29
21-30	31	21-30	15	21-30	31	21-30	14
31-40	2	31-40	3	31-40	2	31-40	3
41-50	4	41-50	2	41-50	4	41-50	2
51-60	3	51-60	1	51-60	3	51-60	1
61-70	1	61-70	0	61-70	1	61-70	0
Se desconoce edad	0	Se desconoce edad	2	Se desconoce edad	0	Se desconoce edad	2

Tabla 1. Distribución de la muestra del proyecto. A la izquierda los escaneos de superficie 3D, a la derecha las fotografías en 2D.



Fenotipado

Para capturar la forma de la arcada dental anterior se estableció un protocolo de fotografías y escaneos de superficie tomados en el Laboratorio de Antropología y Odontología de la Licenciatura en Ciencia Forense, dichas fotografías y escaneos fueron realizados en los mismos individuos, a excepción del individuo 22 y 129 que no se encuentran en las fotografías y por ello la discrepancia entre la tabla 1.

Acercamiento 2D por fotografía científica.

Las fotografías de los modelos dentales (Figura 7) usadas para digitalizar los *landmark* fueron tomadas con una cámara marca Nikon modelo D4, la cual se usó empleando un lente de 50 mm con un filtro UV de 52 mm. El sensor integrado al D4 es un *Full-Frame* (36,00 x 23,90 mm) con una resolución de 16.1 megapíxeles y unas proporciones 3:2 que alcanzan hasta 51 puntos de enfoque, cuenta con visor tipo *Reflex*, con una cobertura de 100% y un factor de ampliación de 0.70x, en una montura Nikon F de aleación de magnesio, la cual esta sellada contra el polvo y la humedad, asimismo posee unas dimensiones de 160x157x91mm

Por su parte el lente de 50 mm viene con un sensor formato FX/35 mm, que cuenta con una distancia focal de 50 mm, una apertura máxima de f/ 1.8 y unas dimensiones 63.5 x 39 mm, el cual fue elegido con base en estudios anteriores por presentar el menor factor de deformación esférica o de borde (Neale, Hessel, & Terpstra, 2011).

El set para capturar las fotografías de los modelos fue montado en una mesa de reproducción fotográfica con un fondo negro, el centroide de la cámara se fijó ortogonalmente a 50 cm de altura, lo cual se mantuvo constante entre tomas. La cámara fue parametrizada con los siguientes valores: ISO -100, con una apertura máxima de 1.6, un punto f de f/5.6 y un tiempo de exposición de ¼ s.

Dichos valores dan una profundidad de campo con un límite cercano de 48.5 cm y de límite lejano de 51.6 cm, dando un total de 3.06 cm. De lo cual el 48%, 1.48 cm, corresponde a la profundidad frente al sujeto, mientras que el 52%, 1.58 cm, corresponde a la profundidad detrás del sujeto.

Para su referencia métrica se colocaron dos escalas en el modelo una metálica contigua a la zona de enfoque y una más de plástico en el fondo de la imagen. El escalado de las fotografías se realizó mediante la escala metálica que se encontraba en el plano de enfoque de la cámara.

Finalmente, solo fue necesaria una fotografía por modelo, las cuales fueron almacenadas en formato *.JPG, con una resolución de 300 pixeles por pulgada horizontalmente y de 300 pixeles por pulgada verticalmente.



Figura 7. Modelo dental en 2D fotografiado con la cámara Nikon D4

Acercamiento 3D por escaneo de superficie de alta resolución.

Para el fenotipado 3D se usaron los mismos individuos de la toma fotográfica. Para ello se usó un cabezal de escaneo de la marca Capture 3D Systems que se encuentra en el LAOF, dicho cabezal usa un *software Geomagic Wrap 2014* como interfaz para obtener un modelo de superficie en formato *.PLY (Figura 8). Entre las características del escáner se encuentran que cuenta con una precisión de 0.060 mm y una velocidad de captura de datos

de 985,000 puntos/escaneo (0.3 seg por escaneo), aunado a que la resolución máxima con la que cuentan las imágenes tomadas por el aparato es de 0.180 mm a 480 mm y un campo de profundidad de hasta 180 mm.

En el caso de los modelos se realizaron en promedio 40 escaneos para lograr la totalidad de la estructura. El resultado del proceso fue editado por medio de un alineamiento automatizado en el programa *Geomagic Wrap*.

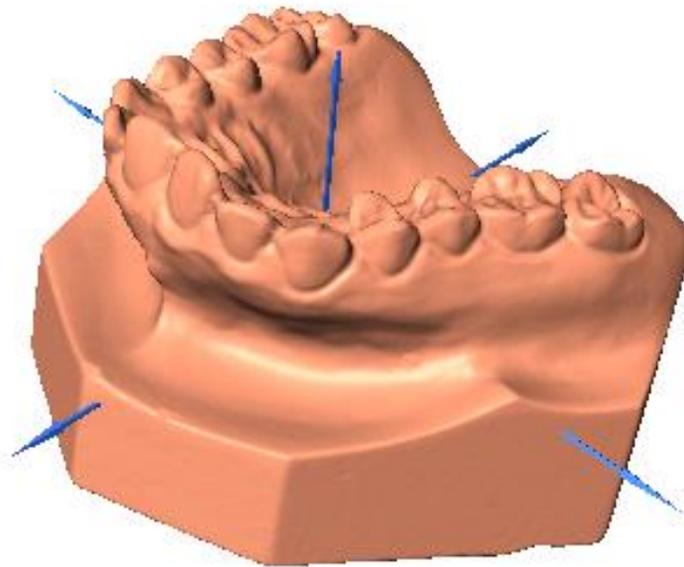


Figura 8. Ejemplo de modelo dental en 3D digitalizado con Capture 3D Systems

Protocolo de landmarks: método de Kieser et al. 2007

Para el *landmarking* se usó el protocolo de puntos o *landmarks* establecido por Kieser et al. en el año 2007 donde se incluyen 24 *landmarks* que marcaban el contorno de los bordes incisales de los dientes anteriores, tanto maxilar como mandibular (Figura 9 y Tabla 2). La primer ronda de puntos, está integrada por 12 *landmarks* tipo II, debido a que son puntos que se sostienen meramente con evidencia geométrica (Bookstein, 1996), los cuales están ubicados en el punto más distante de la arista distal y mesial de la cara incisal de los dientes anteriores. Además, se incluyeron 12 *landmarks* tipo III los cuales están ubicados en el centro de la arista lingual/palatina y labial de la cara incisal de los dientes anteriores. Dichos puntos deben ser colocados en el centro de las aristas, procurando que exista la misma distancia

hacia ambos vértices. A diferencia del protocolo de Kieser en este caso se toman en cuenta los individuos con ausencia dental, por lo que se colocan muy próximos todos los *landmarks* correspondientes al diente faltante lo que permite incluir la ausencia dental como un carácter de análisis en el morfoespacio resultante.

Se efectuó el *landmarking* de los individuos, tanto 2D como 3D, por duplicado de manera independiente. Esto con el fin de observar la fluctuación del error de digitalización, observando la asertividad con la que se emparejan los modelos dentales por digitalización. La digitalización se realiza mediante *software* especializado, para evitar de esta manera el error ocasionado por mediciones tomadas manualmente.

El proceso del *landmarking* se realizó usando el *software* TPSDIG2³ (Rohlf, 2004) y *Landmark*⁴ (Wiley, Amenta, Alcantara, & Ghosh, 2005) para los modelos 2D y 3D respectivamente, siendo que dichos programas han demostrado su gran eficacia con datos de este tipo además de ser libres.

El *software* TPS es un conjunto de aplicaciones que permiten la adquisición de datos de morfometría geométrica en dos dimensiones para su posterior procesamiento. Por su parte, el *software* *Landmark* es una herramienta usada para colocar los puntos de manera sencilla en 3D, con una alta precisión y reproducibilidad en las superficies complejas.

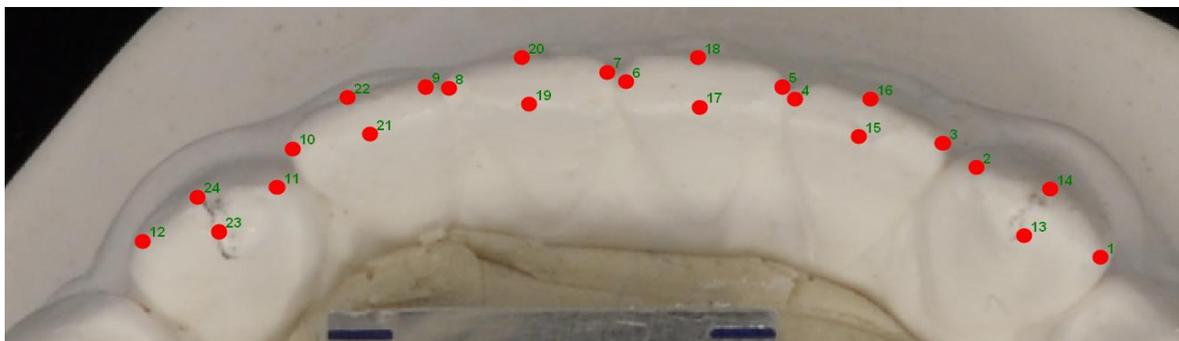


Figura 9. Protocolo de Kieser et al. 2007. Acercamiento a la disposición anatómico-espacial de los *landmarks* a digitalizar

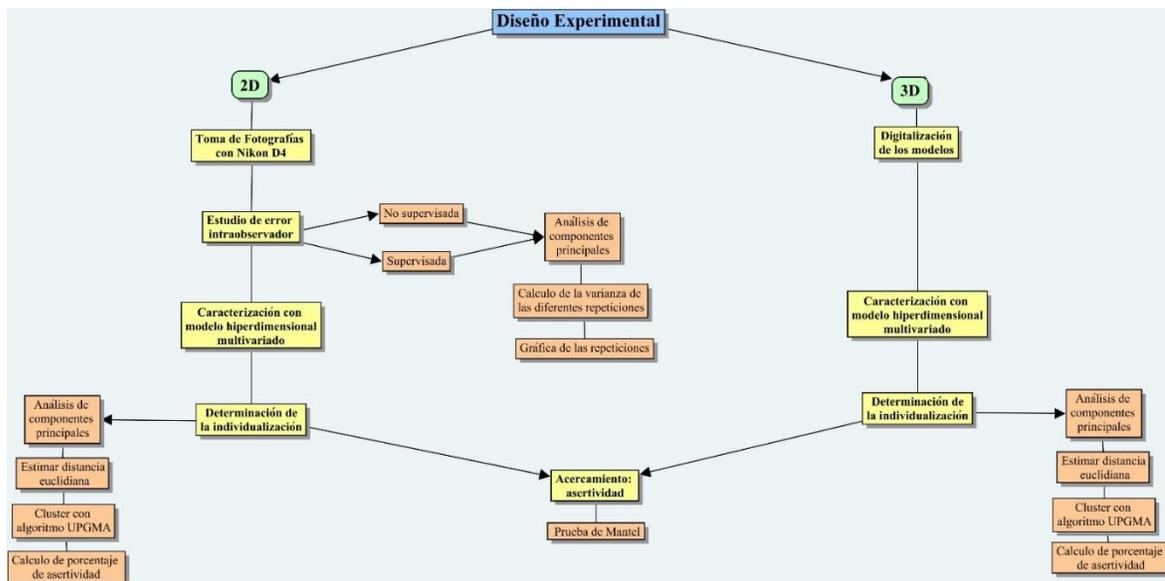
³. <http://life.bio.sunysb.edu/morph/soft-dataacq.html>

⁴. <http://www.idav.ucdavis.edu/research/EvoMorph>

Protocolo de Kieser et al 2007			
N° Landmark	Tipo de Landmark	Definición en mandíbula	Definición en maxila
1	Tipo II	El punto distal más extremo en la superficie oclusal del canino derecho	El punto distal más extremo en la superficie oclusal del canino izquierdo
2	Tipo II	El punto mesial más extremo en la superficie oclusal del canino derecho	El punto mesial más extremo en la superficie oclusal del canino izquierdo
3	Tipo II	El punto distal más extremo en la superficie incisal del incisivo lateral derecho	El punto distal más extremo en la superficie incisal del incisivo lateral izquierdo
4	Tipo II	El punto mesial más extremo en la superficie incisal del incisivo lateral derecho	El punto mesial más extremo en la superficie incisal del incisivo lateral izquierdo
5	Tipo II	El punto distal más extremo en la superficie incisal del incisivo central derecho	El punto distal más extremo en la superficie incisal del incisivo central izquierdo
6	Tipo II	El punto mesial más extremo en la superficie incisal del incisivo central derecho	El punto mesial más extremo en la superficie incisal del incisivo central izquierdo
7	Tipo II	El punto mesial más extremo en la superficie incisal del incisivo central izquierdo	El punto mesial más extremo en la superficie incisal del incisivo central derecho
8	Tipo II	El punto distal más extremo en la superficie incisal del incisivo central izquierdo	El punto distal más extremo en la superficie incisal del incisivo central derecho
9	Tipo II	El punto mesial más extremo en la superficie incisal del incisivo lateral izquierdo	El punto mesial más extremo en la superficie incisal del incisivo lateral derecho
10	Tipo II	El punto distal más extremo en la superficie incisal del incisivo lateral izquierdo	El punto distal más extremo en la superficie incisal del incisivo lateral derecho
11	Tipo II	El punto distal más extremo en la superficie oclusal del canino izquierdo	El punto distal más extremo en la superficie oclusal del canino derecho
12	Tipo II	El punto distal más extremo en la superficie oclusal del canino izquierdo	El punto distal más extremo en la superficie oclusal del canino derecho
13-24	Tipo III	Doce puntos ubicados en el centro de la arista lingual y labial de los dientes anteriores	Doce puntos ubicados en el centro de la arista palatina y labial de los dientes anteriores

Tabla 2. Protocolo de *landmarks* empleado en el estudio basado en la metodología de Kieser et al. 2007.

Diseño experimental



Esquema 1. Diseño experimental. Diagrama de flujo del diseño experimental de la tesis.

Estudio de error intraobservador.

Como primer punto del diseño, se realizó una prueba de error intraobservador no supervisada, es decir sin realizar confronta de resultados con algún revisor. Para ello se eligieron 10 modelos al azar, 5 mujeres y 5 hombres, a los cuales se les aplicó el protocolo de Kieser en 10 ocasiones diferentes. Entre cada digitalización existía uno o dos días de diferencia para evitar la memorización de la ubicación exacta de los *landmarks* en estos modelos específicos.

Posterior a esto se analizaron los resultados con ayuda del *software MorphoJ*⁵ (C. Klingenberg, 2011), el cual es un *software* de descarga libre especializado en morfometría geométrica. Entre las ventajas de dicho programa, es que provee los análisis más importantes que se usan en la morfometría geométrica, aunado a que analiza información tanto 2D como 3D de una manera bastante amigable para el usuario.

⁵. http://www.flywings.org.uk/morphoj_page.htm

La prueba consiste en revisar la varianza de cada repetición realizada en un morfoespacio de forma (*shape*), en el *software MorphoJ*, realizando un análisis de componentes principales (ACP). Entre los resultados que este análisis arroja, se encuentra una varianza total, la cual se le calcula a cada una de las repeticiones para posteriormente graficarlas y observar el patrón en función de las repeticiones realizadas con la hipótesis de que la varianza vaya disminuyendo entre cada repetición. Complementario al ACP, se calcularon análisis de variación canónica (AVC) en el *MorphoJ* para conocer si existían diferencias significativas (matriz de distancias y valores *p*) entre digitalizaciones. El AVC es un método que permite encontrar las características de la forma (*shape*) que mejor ayuden a distinguir entre los diferentes grupos de especímenes. Este método supone que la pertenencia a un grupo se conoce *a priori*.

Independientemente del resultado obtenido en la prueba anterior se diseñó una segunda prueba de error esta vez supervisada. Esta segunda prueba de error consistía en 4 individuos, 2 del sexo masculino y 2 del sexo femenino, a los cuales se les aplicó el protocolo de Kieser en 5 ocasiones diferentes. Del mismo modo existía un par de días de diferencia entre cada digitalización. Esta prueba se realizó, 7 meses después de la no supervisada, durante mi estancia en el laboratorio de antropología forense de la Universidad de Australia del Occidente, bajo la tutela de los Drs. David Franklin y Ambika Flavel.

Posteriormente, se volvió a realizar el ACP y ACV en cada repetición de la misma manera que en la prueba no supervisada.

Caracterización mediante modelo hiperdimensional multivariado.

La perspectiva de análisis de la presente tesis está construida con base en un análisis multivariado, el cual tiene como objetivo analizar conjuntos de datos en los que existen múltiples variables que pueden explicar el patrón de variación observado en los individuos estudiados. En el caso del diseño de la tesis se incluyeron múltiples clasificadores (sexo, arcada, iteración, clase de mordida de acuerdo a Angle (Noyes, 1942), número de toma de molde) y covariables que pueden llegar a entrelazarse con la variación observada en la muestra. A continuación se describen los cuatro pasos de la caracterización:

Individuos fuera del rango de variación normal.

Como primer paso, se realiza un análisis de los individuos fuera del rango de variación normal, con ayuda del *software MorphoJ*. Para ello se debe revisar los individuos que se están en los puntos más extremos de la muestra, los cuales pueden ser visualizados mediante la herramienta *Outliers* de *MorphoJ*, que nos indica la desviación de la forma (*shape*) de un individuo con respecto al promedio de la muestra (*average shape*) y que además realiza un diagrama con la distribución acumulada de las distancias de cada individuo a la forma promedio usando una distancia de Mahalanobis, la cual nos proporciona un indicador de que tan inusual es un individuo en relación con los otros en la muestra.

Una vez identificados estos individuos se realizará una supervisión de los mismos para averiguar la razón por la cual se salen de la norma, validando que se trate de variaciones en su morfología y que no sea un error de digitalización. Esta prueba de control es determinante en el caso de la aplicación de la caracterización mediante el modelo hiperdimensional multivariado.

Exploración del efecto de covariables en la forma: modelo de regresión múltiple 2D y 3D.

Posterior a este punto, se analizará, mediante una regresión múltiple, la posible dependencia lineal entre la forma y las covariables: edad, duración del tratamiento, tamaño (*centroide size*) y sexo. Por ejemplo, la alometría que son los cambios en la forma relacionados con los cambios relativos en tamaño, en el marco forense, sería una proporción de variación del tamaño en dos estructuras que deberían tener las mismas proporciones, sin embargo no la tienen debido a la individualidad de cada sujeto (Villanueva & Farrera, 2015).

En este punto del análisis se evaluó si la arcada analizada (modelo superior o inferior) o la duración del tratamiento (previo o posterior) explicaba el patrón fenotípico observado, es decir, se espera que en las regresiones y ACP (siguiente sección) se discriminen estos grupos, en el *software MorphoJ*. Si resultara discriminante la base de datos se segmentara para cada uno de estos efectos.

Para la regresión previamente mencionada primero se deben cargar las covariables a nuestra base de datos. Covariables como la duración del tratamiento, edad inicial, tamaño del centroide, sexo y que tipo de arcada se analizó. Posteriormente, con la ayuda de la herramienta regresión lineal del programa *MorphoJ* se eligen los componentes que se van a graficar, escogiendo el componente simétrico como la variable dependiente y las covariables como la variable independiente.

La regresión arrojará varios resultados, entre los que se encuentra el porcentaje de varianza explicado con el modelo y el valor de p , en esta tesis la tolerancia o intervalo de confianza elegido es $\alpha= 0.01$, lo que indicaría que en esas variables habría una relación lineal con la forma de las arcadas del individuo. Finalmente, para realizar un análisis más detallado, se informan regresiones individuales para tamaño y forma, explorando el tipo de arcada y tratamiento dental en el modelo (Figura 10) con la finalidad de conocer si las pendientes de las regresiones cambiaban de acuerdo a estas variables.

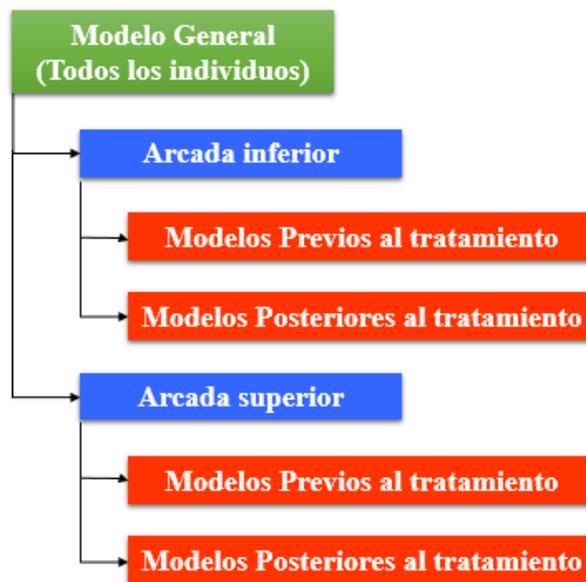


Figura 10. Segmentación de las bases de datos a lo largo del proyecto.

Estimación de la individualización por conglomerado de la arcada dental: experimento 2D y 3D.

Para la estimación de individualización la secuencia de análisis será la misma para los experimentos en 2 y 3 dimensiones. Para estimar la individualidad de las arcadas en las

fotografías y escaneados de superficie se hace uso del *software MorphoJ*, realizando un análisis de generalizado de Procrustes (AGP), que como ya fue explicado elimina efectos de rotación, traslación y escala de los datos a analizar (C. Klingenberg, 2010). Después, se calcula una matriz de varianza-covarianza a partir de la cual se realiza un Análisis de Componentes Principales (ACP), cuya finalidad es expresar un conjunto de variables en una serie de combinaciones lineales de factores no relacionados entre sí dando como resultado la variabilidad de los datos, viendo si los primeros componentes contemplan la mayoría de la variación en los datos originales. Este análisis fue realizado en el *software* especializado *MorphoJ* (Klingenberg, 2011).

Entre las ventajas de este análisis se encuentran que nos permite caracterizar la variabilidad de una muestra en función de un espacio multivariado de forma (morfoespacio). Además es posible estimar la distancia euclidiana sobre las coordenadas obtenidas del ACP entre cada individuo de la muestra (biodistancia fenotípica). La matriz obtenida permite además efectuar un análisis de conglomerado o *cluster* por medio del algoritmo de análisis de rama por promedio pareado no ponderado (UPGMA), con la intención final de que cada individuo de estudio se agrupe con su par correspondiente, sin esperar algún problema de apareamiento.

El algoritmo UPGMA es comúnmente usado ya que es una variante de algoritmos para crear *cluster*, mayoritariamente en análisis filogenéticos, que ha demostrado tener una gran eficacia para realizar dendrogramas mediante el esquema de la unión a la pareja más cercana (Rodrigo & Drummond, 2000). Dicho algoritmo consiste básicamente en la búsqueda de la distancia más pequeña en la matriz de distancias, sin ponderación alguna, agrupando las unidades que la conforman como una sola unidad independiente (Gronau & Moran, 2007), es decir, que busca la menor distancia fenotípica entre todo el universo de individuos, que según la hipótesis debería ser la distancia entre cada par de individuos. Si un carácter empleado para individualizar falla en realizar pareos en un morfoespacio no debe ser considerado para casos forenses.

Para la creación de los *cluster* se usó el *software Past*⁶ (Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, 2001) en su versión 3.22, este es un programa de descarga libre especializado en

⁶. <https://folk.uio.no/ohammer/past/>

análisis de datos científicos con funciones para realizar estadísticos multivariados, morfométricos, entre otros. Como una medida de la resistencia del resultado obtenido, la topología del *cluster* fue permutada 10000, lo que resultaba en un porcentaje de clasificación correcta a través de todas esas iteraciones. La finalidad de este último paso es conocer si el resultado se mantiene después de dichas iteraciones, esperando que se obtengan valores de >95% de clasificaciones correctas.

Una clasificación correcta ocurre cuando un individuo de la primera digitalización aparece pareado con su correspondiente individuo de la segunda digitalización. Esto se espera en el 100% de los pareos, lo cual es un modelo nulo. Empero, también puede ocurrir otros fenómenos conocidos como: grupos externos y/o miméticos. Los grupos externos pueden ser entendidos como un individuo que crea un grupo con un par que está clasificado correctamente. Por su parte, los grupos miméticos son dos individuos diferentes cuyas estructuras son parecidas y por lo tanto se da una coincidencia fenotípica. Estos dos casos pueden ser ocasionados por errores en la digitalización, por lo que en caso de aparecer se debe realizar una revisión/validación del fenotipado, para observar si dichos grupos persisten después de las correcciones de estos individuos mal digitalizados. Mediante este punto podemos tener entonces porcentajes de asertividad, es decir, las veces en que se clasificó correctamente, como grupo externo o mimético, generando resultados previos y posteriores a la corrección de la digitalización (si es que hubiera alguna). Este último rubro es un segundo punto de control independiente al de la revisión de los *Outliers*, es de importancia señalar que en pasados trabajos se reportan controles o puntos de validación similares. Luego entonces el porcentaje final de grupos miméticos y externos solo podrá ser definido posterior a la revisión.

Reproducibilidad 2D y 3D: asertividad

Subsecuente a obtener los resultados tanto 2D como 3D, se comparan los dos espacios de forma en los *cluster* realizados, con la finalidad de calcular la sensibilidad de ambos e inferir cuál de los dos modelos logra una mejor individualización o si, por el contrario, no existe diferencia alguna entre ambos. Luego entonces, para observar si los experimentos

presentan una similitud, es decir que ambos sean útiles de igual manera para individualizar las arcadas, se utilizó un test de Mantel (Mantel, 1967).

El primer paso es equiparar las bases de datos, es decir que se trate de los mismos individuos en fotografías y escáneres de superficies, después de ello se retoman las matrices de distancia en los *PCscores* de los espacios en 2D y 3D. Sobre estas matrices se realiza la prueba de Mantel, que consiste en calcular la correlación de las entradas en las matrices para después permutarlas y calcular el estadístico en cada ocasión. Posteriormente se compara el estadístico original con la distribución de cada permutación para generar un valor p .

Todo lo anterior se realiza en el *software* R, que es un ambiente de *software* de descarga libre, el cual es útil para realizar el cálculo de estadísticos y graficarlos.

RESULTADOS

Error intraobservador: prueba no supervisada.

En la gráfica del ACP (Figura 11-A), se observa que a pesar del número de repetición de la digitalización, los individuos se encuentran suficientemente alejados entre sí ($n=7$), es decir su distancia fenotípica es constante, en el morfoespacio. Sin embargo, los individuos cuatro, siete y nueve se encuentran superpuestos entre ellos, con una distancia fenotípica próxima de 0.01. Mostrándose que el grupo de los individuos seis se encuentra en el componente negativo tanto del PC1 y del PC2, por su parte el grupo de los individuos cinco, cuatro, siete y nueve se encuentran en el componente negativo del PC1 pero en el componente positivo del PC2. Sin embargo, el grupo de los individuos cinco presentan una distancia de 0.06 del resto de los grupos de este cuadrante estando alejado en el morfoespacio, aunado a que es la mayor distancia entre centroides que se presenta en esta gráfica. Los dos conjuntos más separados, por una magnitud de 0.12, son el de los individuos cinco y tres.

Los individuos cero, tres y ocho se encuentran en el componente positivo del PC1 pero en el lado negativo del PC2. Finalmente, los grupos de los individuos uno y dos se encuentran en los componentes positivos tanto del PC1 como del PC2.

Cuando se usa un clasificador para las repeticiones la superposición entre estas es constante, aunque existe fluctuación entre la varianza de cada una de estas (ver anexo 1, Figura 1.1). Dicho ACP arrojó la varianza total de cada repetición (Tabla 3, Figura 13), en la figura 13 A se observa el patrón de varianza total de esta prueba, vislumbrándose que las primeras tres repeticiones siguen un patrón de disminución de varianza constante. No obstante, entre la repetición cuatro y cinco hay un gran aumento de la varianza que supera inclusive la primera repetición, aumentando de un valor de 0.00236560 a 0.00265716 demostrándose que en estas repeticiones el error de medición se vio exacerbado y por ello se comporta de esa manera la gráfica. Después de la repetición seis el patrón de disminución constante de la varianza se repite.

En el AVC (Figura 11-B) realizado se observa que las repeticiones se tienden a superponer en función de las iteraciones, el cual es el resultado esperado, las más distantes serían las repeticiones uno, dos y cuatro para el primer eje de variación canónica. Se vislumbra que la mayoría de las repeticiones se encontraron en el componente positivo del eje canónico uno (C1) a excepción de las repeticiones uno y dos. En cuanto al eje C2, las

repeticiones dos, tres, cuatro y seis se encuentran en el componente positivo de este, mientras que el resto se encuentra en el componente negativo del eje C2. Observándose como un conjunto, y teniendo en cuenta que el CVA tiende a maximizar las diferencias entre grupos, se percibe que la distancia fenotípica entre conjuntos es de 1 a excepción de las repeticiones uno, dos y cuatro cuya distancia es de magnitud 12, 4 y 2 respectivamente.

Del análisis de las matrices de distancias de *procrustes* del AVC se deduce que ningún par de repeticiones en la prueba resultó significativa con 10000 permutaciones (ver anexo 1, figura 1.2). Finalmente, resta decir que el patrón de varianza entre digitalizaciones o repeticiones no es homogéneo lo que es consistente con el ACP.

Prueba supervisada.

Con la finalidad de reevaluar el error en el protocolo de medición, para tener una idea de la evolución del mismo en una segunda medición, además de hacerla supervisada, se realizó un ACP y un AVC que arrojaron un patrón interesante, al observar el ACP (Figura 12 A) se ve que entre los individuos hay una distancia fenotípica mayor en el morfoespacio, sin superponerse ninguno de los individuos ($n=4$). El grupo de los individuos cero y tres se encuentran en el componente positivo del PC1 pero en el componente negativo del PC2, el individuo uno se encuentra en los componentes positivos tanto del PC1 como del PC2, por último, el grupo de los individuos dos se encuentra en los componentes negativos tanto del PC1 como del PC2. La mayor distancia en el PCA es entre el grupo de los individuos cero y dos, siendo de una magnitud de 0.25.

Al usar un clasificador para las repeticiones, se observa que la superposición entre estas es constante, aunque existe fluctuación entre la varianza de cada una de estas (ver anexo 1, Figura 1.3). La varianza que arroja el ACP (Tabla 3, Figura 13-B) tiene una disminución constante en la totalidad de las repeticiones siendo el resultado esperado, disminuyendo de 0.01488403 a 0.01444843.

En el AVC (Figura 12-B) se observa una mejor relación entre las digitalizaciones, a excepción de la repetición uno que no se une a los otros grupos, mientras que el resto de ellas se superponen entre ellas. Las repeticiones uno y dos se encuentran en el componente positivo del eje C1 y en el componente negativo del eje C2, la repetición tres se encuentra en el

componente positivo del eje C2 y justo en el centro del eje C1, finalmente, las repeticiones cuatro y cinco se encuentran en el espacio negativo tanto del eje C1 y C2. Viéndolo como un conjunto se observa una menor distancia fenotípica entre las digitalizaciones, a excepción de la repetición uno.

Del análisis de las matrices de distancias de *procrustes* y de *Mahalanobis* del AVC se deduce que ningún par de repeticiones en la prueba resultó significativa con 10000 permutaciones (ver anexo 1, figura 1.4).

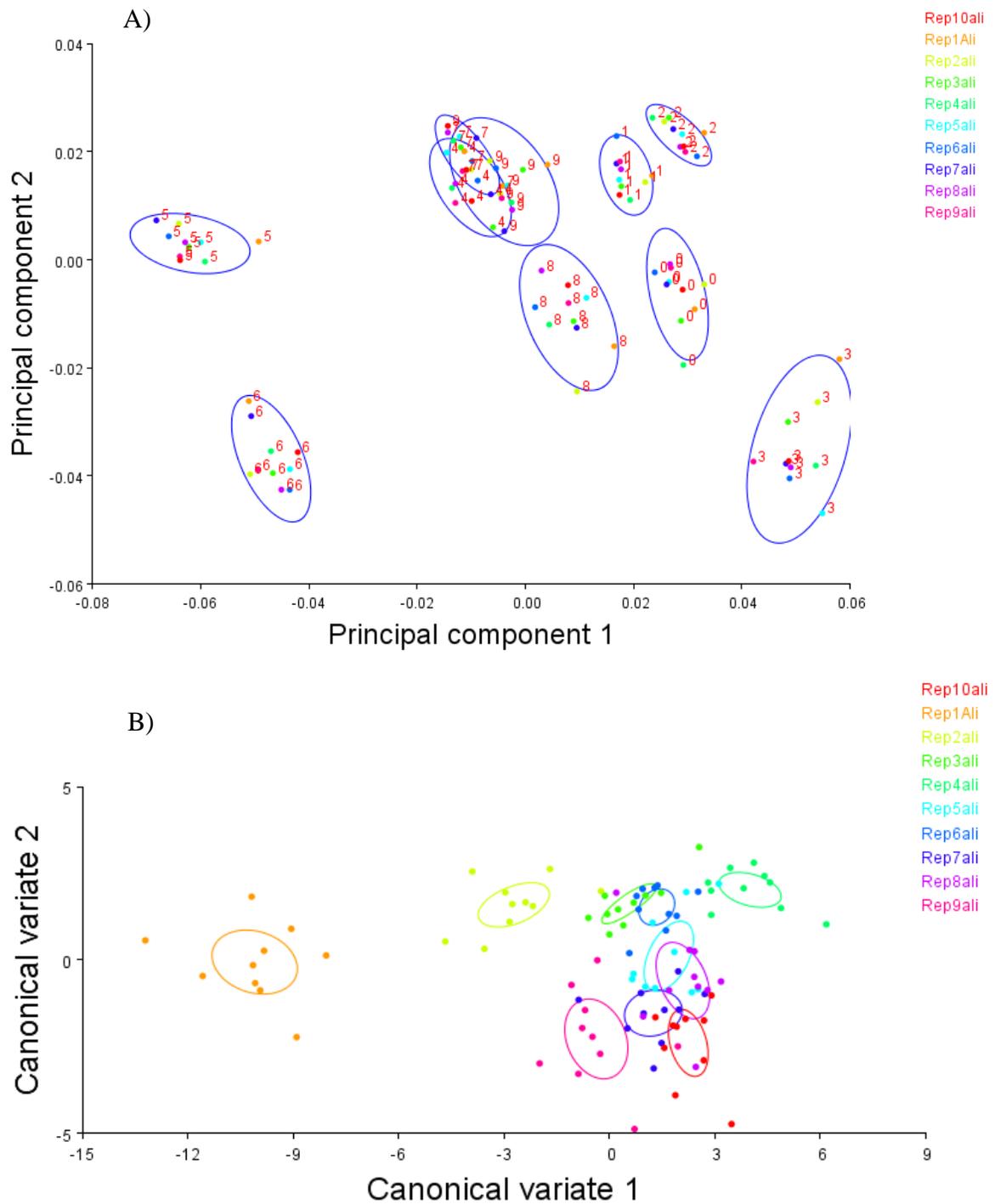


Figura 11. Exploración del error intraobservador en la prueba no supervisada. A) ACP de cada repetición en la prueba de error no supervisada, PC1= 46.17% y PC2=18.986%. B) AVC de las mismas repeticiones en la prueba de error no supervisada, las elipses muestran el 90% de la variación, C1=69.468% y C2=12.37%

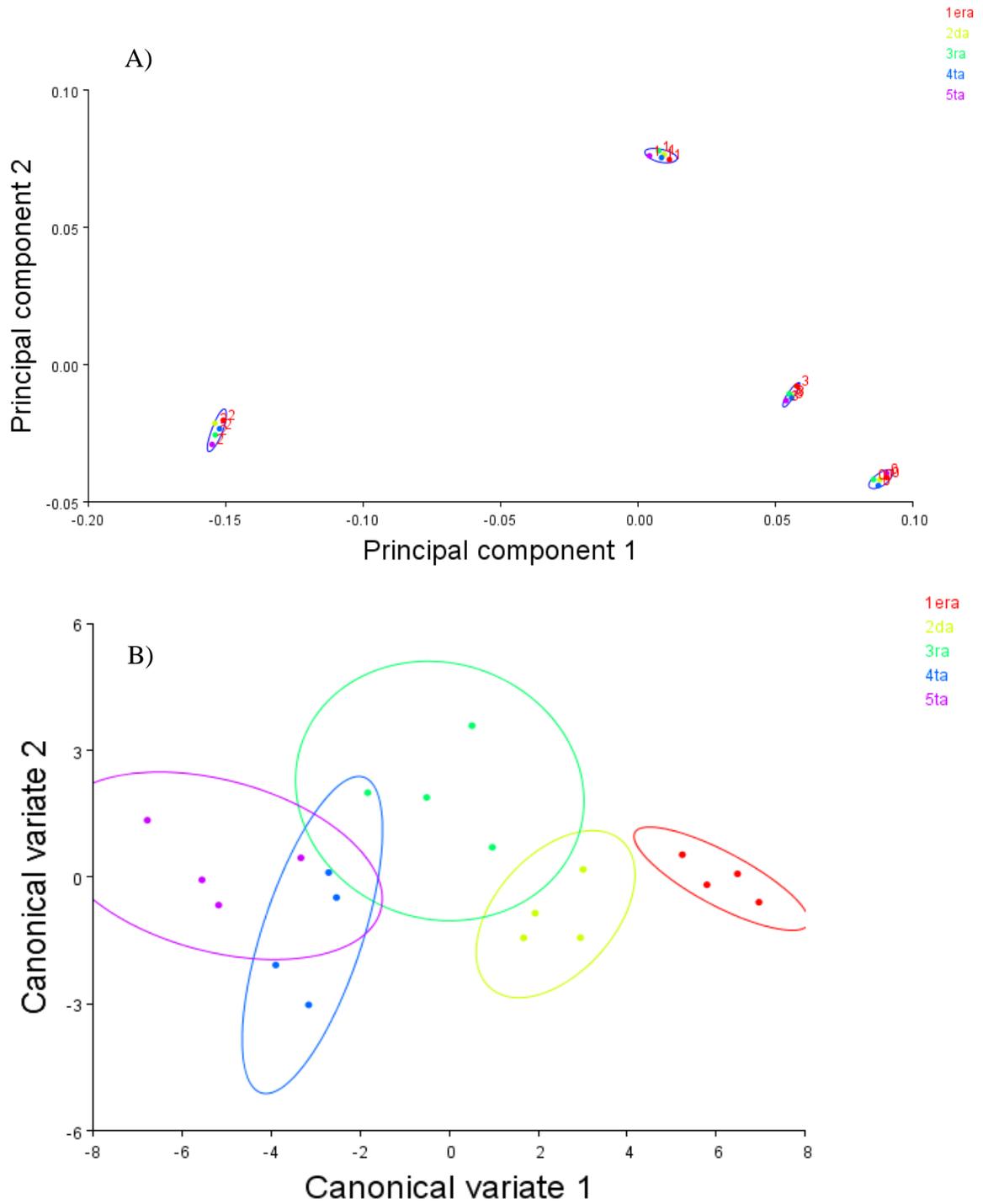


Figura 12. Exploración del error intraobservador en la prueba supervisada. A) ACP de cada repetición en la prueba de error supervisada, PC1=78.547% y PC2=18.772%. B) AVC de las mismas repeticiones en la prueba de error supervisada, las elipses muestran el 90% de la variación, C1=88.588% y C2=7.672%.

Varianza de la prueba de error intraobservador			
No supervisada		Supervisada	
Repetición	Varianza	Repetición	Varianza
1	0.00263665	1	0.01488403
2	0.00263554	2	0.01461381
3	0.00236560	3	0.01456356
4	0.00252419	4	0.01453981
5	0.00265716	5	0.01444843
6	0.00264389		
7	0.00265193		
8	0.00260753		
9	0.00252134		
10	0.00241175		

Tabla 3. Varianza obtenida de cada repetición en la prueba de error no supervisada a la izquierda y las pruebas supervisada.

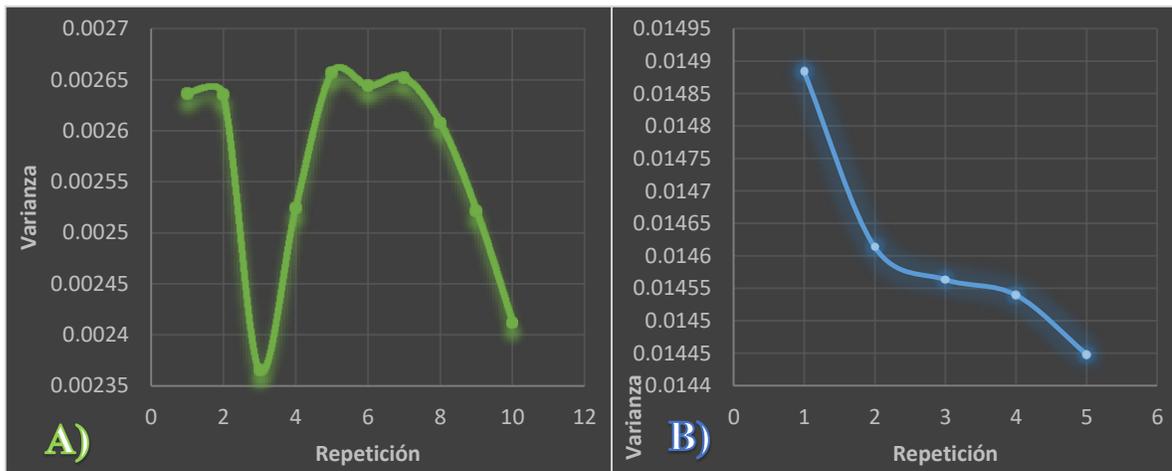


Figura 13. Varianza de la pruebas de error intraobservador graficada. A) Varianza graficada en la prueba de error no supervisada para el acercamiento 2D. B) Varianza graficada en la prueba de error supervisada para el acercamiento 2D

Caracterización mediante modelo hiperdimensional multivariado.

Como se estableció en la metodología, el primer paso era revisar los *outliers*, lo cual ayudaría a verificar que estos no fueran errores de digitalización. Se verificaron la totalidad de los individuos poniendo énfasis en los que tenían mayor variación fenotípica, obteniendo que los individuos que más se alejaban de la norma era debido a que la morfología de estos era muy diferente a la esperada (Figura 14 y 15), no encontrando errores de digitalización en este primer paso.

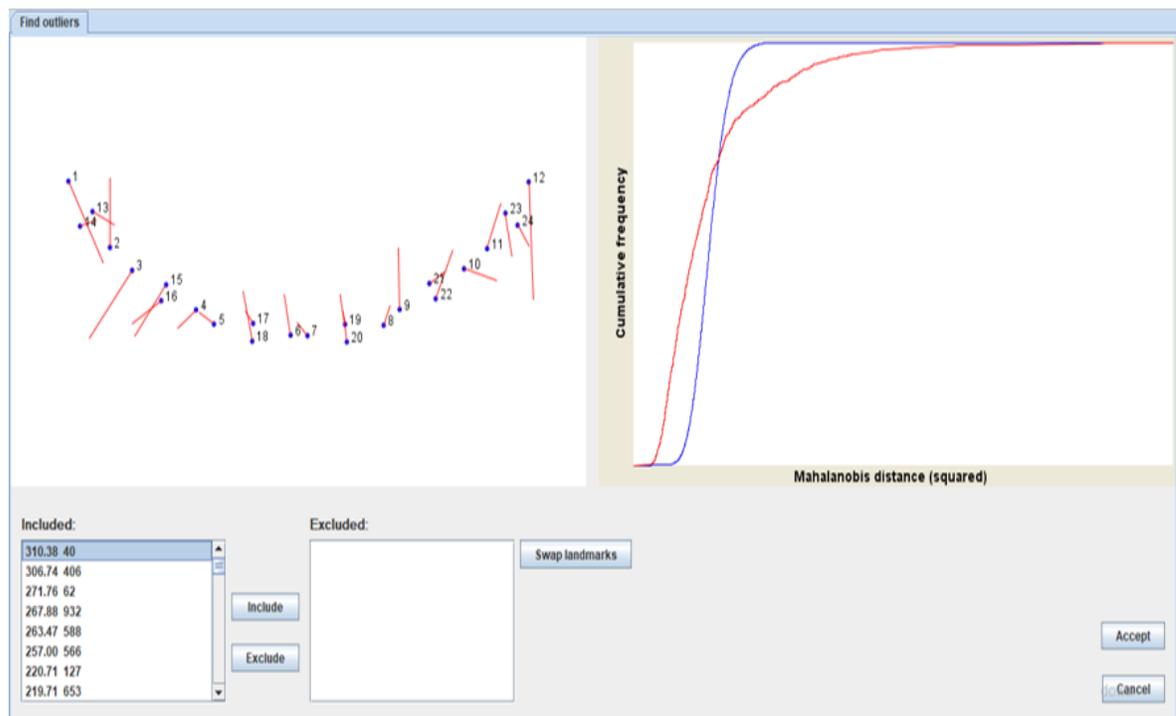


Figura 14. Ejemplo de un individuo *Outlier* de la muestra en 2D. En la esquina superior izquierda de la interfaz se observa un panel que contiene un diagrama mostrando como puntos azules la forma promedio (*average shape*), mientras que las líneas rojas representan la desviación del espécimen seleccionado. Por su parte, en el lado derecho se muestra un diagrama de la distribución acumulada de las distancias individuales de cada espécimen a la forma promedio (*average shape*) de la muestra. La curva azul es la curva esperada en la distribución normal multivariada ajustada a los datos, mientras que la curva roja es la distribución de las distancias reales en la muestra. La distancia de Mahalanobis nos expone que tan inusual es un individuo en relación con la forma media del conjunto de datos.

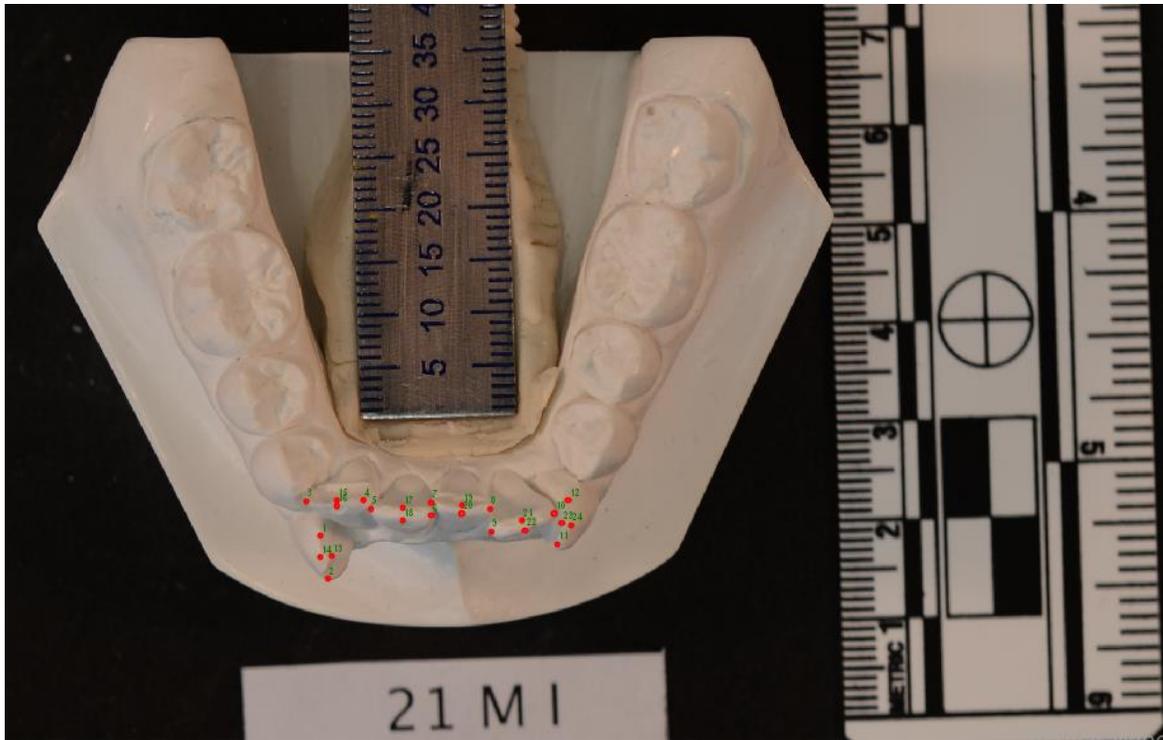


Figura 15. Ejemplo de un individuo *Outlier* observado en el software *TPSDig*. Muestra de la digitalización del individuo 21MI que demuestra una morfología fuera de la norma, razón por la cuál es considerado por el programa como un individuo *outlier*. Aquí el proceso de validación de datos resultó determinante para la discriminación de todos los casos candidatos a ser individuos fuera del rango.

Modelo de regresión multivariada.

En las regresiones realizadas para observar las distintas variables con relación a la forma (Figuras 16 y 17), tanto en 2 como en 3 dimensiones, se distingue en la gráfica que en la duración del tratamiento conforme aumenta la temporalidad del mismo los incisivos centrales tienden a tomar una posición más vestibular, los incisivos laterales lingual y los caninos rotan ligeramente en su eje hacia mesial, dando una forma más estrecha y con un ángulo menor. Por el contrario, conforme aumenta la edad las arcadas dentales aumentan sus dimensiones, en anchura, aunado a que los incisivos centrales se posicionan en una ubicación más lingual en su porción mesial. En cuanto al tamaño del centroide, se observó que el tamaño estaba relacionado al tipo de arcada del que se trataba, por ende, los incisivos laterales de la arcada superior son de mayor tamaño y los caninos se rotan ligeramente en su porción distal. Finalmente, de acuerdo al sexo, los caninos suelen ser de mayores dimensiones y la arcada es más ancha en el caso de los individuos masculinos. Del análisis de las figuras 16 y

17 se observa que el tamaño es la variable que explica el patrón fenotípico de forma y tamaño de la arcada superior e inferior, para ambas dimensiones (2D y 3D) siendo positiva la pendiente de la regresión (2D: $r^2=0.16$, $p<0.0001$, 3D: $r^2=0.2$, $p<0.0001$).

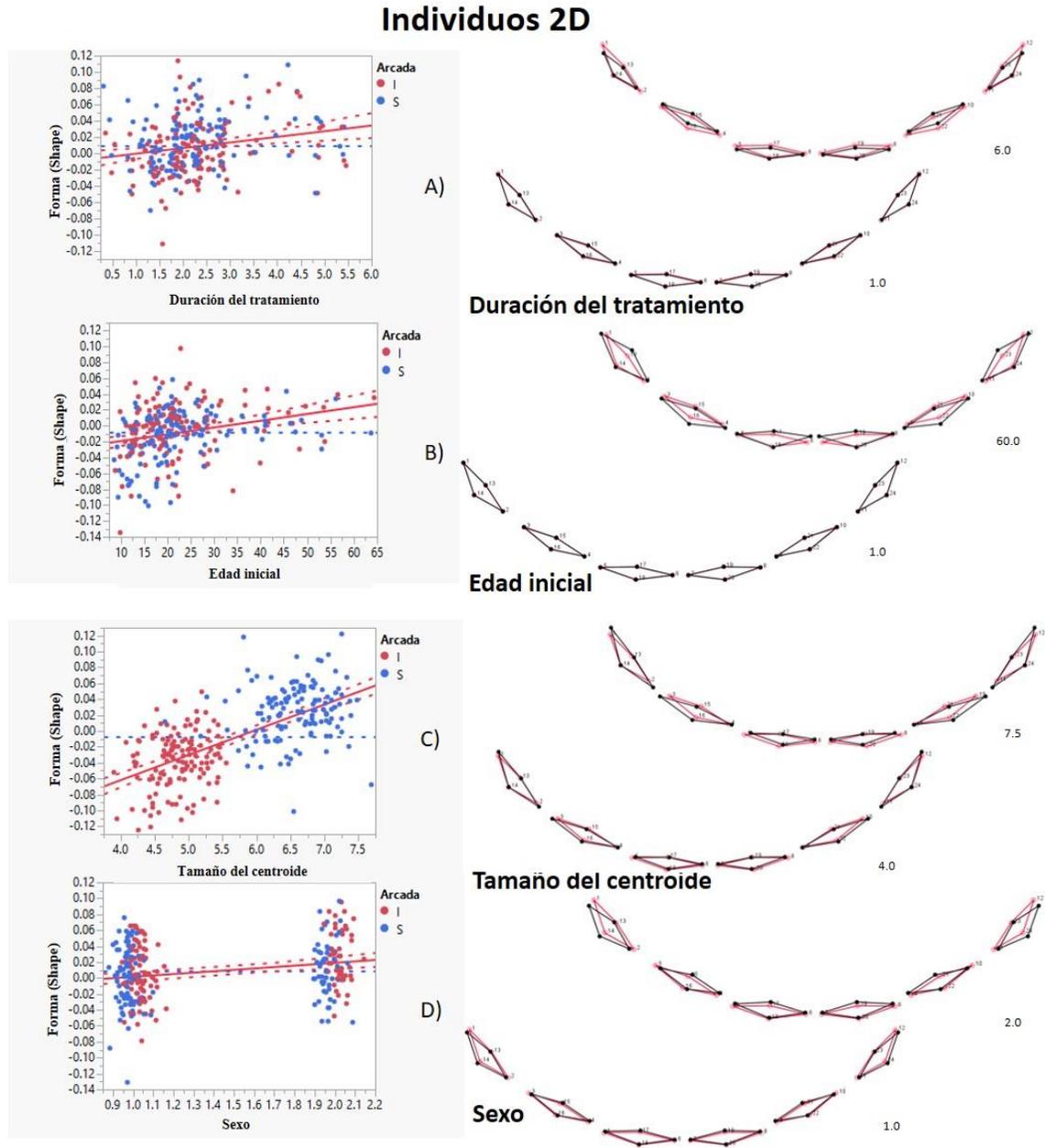


Figura 16. Modelo general de regresión múltiple del espacio 2D. Regresiones entre la forma de las arcadas dentales anteriores 2D y covariables. A) Duración del tratamiento, B) Edad inicial, C) Tamaño del centroide y

D) Sexo. Lado derecho de la gráfica regresiones lineales: se muestran las líneas de ajuste medio de la regresión (línea continua) y el intervalo 95% (línea discontinua), en círculos azules la arcada superior y en círculos rojos la arcada inferior. De lado izquierdo de la gráfica, se muestran los cambios de forma para cada una de las comparaciones se muestra una comparación entre la forma promedio, en rojo, y las deformaciones de la estructura en el extremo de cada variable, en negro.

Individuos 3D

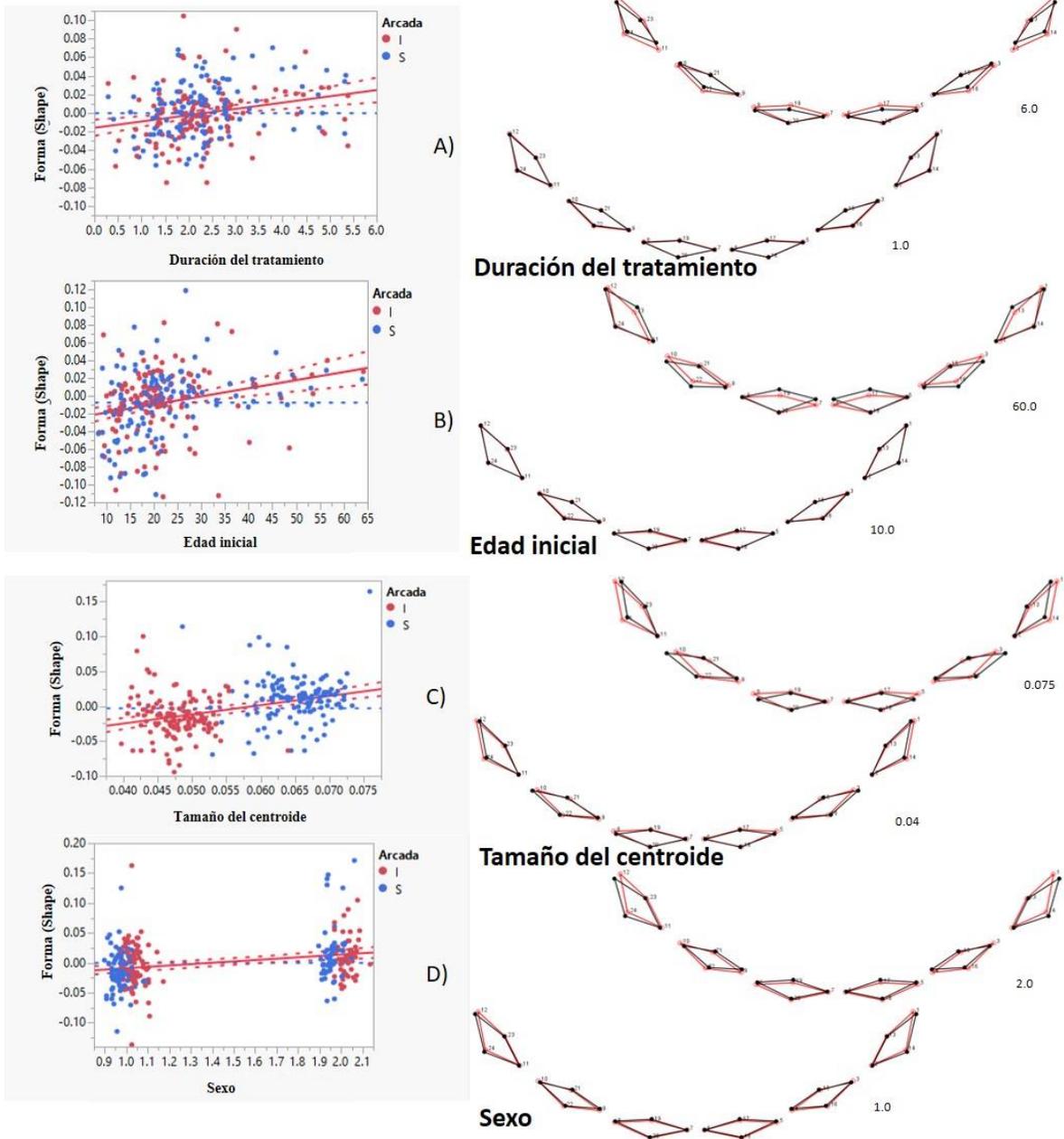


Figura 17. Modelo general de regresión múltiple del espacio 3D. Regresiones entre la forma de las arcadas dentales anteriores 3D y covariables. A) Duración del tratamiento, B) Edad inicial, C) Tamaño del centroide y D) Sexo. Lado derecho de la gráfica regresiones lineales: se muestran las líneas de ajuste medio de la regresión (línea continua) y el intervalo 95% (línea discontinua), en círculos azules la arcada superior y en círculos rojos la arcada inferior. De lado izquierdo de la gráfica, se muestran los cambios de forma para cada una de las comparaciones se muestra una comparación entre la forma promedio, en rojo, y las deformaciones de la estructura en el extremo de cada variable, en negro.

El modelo general de la forma respecto de la duración del tratamiento, edad en la que inicia el tratamiento, tamaño del centroide y sexo (Tabla 4), dio como resultado una varianza predicha de 26% para el modelo 2D ($p=<0.0001$) y de 21% para el caso del 3D ($p=<0.0001$). Así mismo, en las regresiones para las arcadas superior e inferior, pre y post tratamiento, se observa que en la mayoría de las bases de datos el porcentaje de predicción aumenta con las correcciones que se realizaron en la digitalización, a excepción de los modelos posteriores al tratamiento en la arcada superior, en la cual el porcentaje disminuye de 21.45% a 21.44%. El aumento en los porcentajes, fue la razón por la que a partir de esta sección se toman en cuenta los resultados posteriores a la corrección de la digitalización ya que existía varianza explicada por errores de digitalización, siendo toda la muestra la que mejor porcentaje de predicción posee (2D=26.56% y 3D=21%), seguida de los modelos posteriores al tratamiento de la arcada superior (2D=22.897 y 3D=21.44%). Mientras que los modelos previos al tratamiento de la arcada inferior son los que menor porcentaje tienen (2D=6.86% y 3D=6.65%), es decir existe una disminución de la varianza en función de tener o no tratamiento.

Porcentaje de predicción				
	2D		3D	
	Pre correcciones	Post correcciones	Pre correcciones	Post correcciones
Toda la muestra	26.8237%	26.5611%	21.2273%	21.5133%
Arcada inferior	6.7093%	6.8657%	5.6262%	5.5183%
Pre tratamiento	6.5676%	6.8443%	6.5104%	6.6536%
Post tratamiento	17.3823%	18.1872%	13.6259%	14.0980%
Arcada superior	10.2838%	10.0054%	10.6630%	10.6706%
Pre tratamiento	8.4766%	8.3259%	10.9307%	11.0043%
Post tratamiento	24.6531%	22.9726%	21.4519%	21.4419%

Tabla 4. Porcentaje de predicción en las regresiones del centroide. Porcentaje de predicción de las regresiones previo a las correcciones en la digitalización y posterior a las mismas.

De las regresiones lineales específicas entre la forma y el tamaño en el modelo general (Tabla 5) la variable con un mayor valor de varianza explicada es el tamaño del centroide, además de ser significativa estadísticamente. Después, la edad inicial, no obstante, el valor de R^2 es menor, tres veces para el caso de los individuos en dos dimensiones y dos veces

menor para los individuos en tres dimensiones, comparado con el valor del centroide. Seguido de la duración del tratamiento y el sexo en último lugar, siendo la variable que menor explica el fenómeno individualizador en los dientes anteriores. De igual manera, en el caso del sexo tuvo un valor significativo únicamente en el acercamiento 3D.

Estadísticos de las regresiones específicas				
	Covariable	R ²	R ² ajustada	p
2D	Duración de tratamiento	0.033738	0.032796	0.0007
	Edad Inicial	0.033749	0.032807	<0.0001
	<i>Centroid Size</i>	0.160042	0.159223	<0.0001
	Sexo	0.02143	0.020476	0.8719
3D	Duración de tratamiento	0.047504	0.046559	0.001
	Edad Inicial	0.058733	0.057799	<0.0001
	<i>Centroid Size</i>	0.200465	0.0199672	<0.0001
	Sexo	0.048484	0.04754	<0.0001

Tabla 5. Estadísticos de las regresiones lineales multivariadas de los espacios 2D y 3D. Se muestran los valores estimados en las regresiones, R², R ajustado y valor p.

Tamaño

En las regresiones lineales del tamaño y la forma (componente alométrico) en relación con el tipo de arcada, tanto para 2D como para 3D, se observó en ambos casos que la variable independiente que tenía mayor efecto en los individuos era el tamaño del centroide, siendo así que se observaba una clara dependencia de la forma (*shape*) con la variable que indicaba si se trataba de una arcada superior o inferior (Figura 18), con los valores que se observan en la tabla 6. Además, es observable el cambio en las pendientes de las líneas de ajuste para cada arcada (superior e inferior), donde en el caso de 2D resultan de tendencia negativa y en el 3D positivas. Destaca en estas regresiones la clara diferencia en tamaño de las arcadas superiores e inferiores, lo cual se ve reflejado en las figura 18, observándose que en los individuos en 2D, las arcadas inferiores tienen una dispersión de 2.5 en la escala del centroide, mientras que sus antagonistas poseen un valor de dispersión de 3; en los individuos en 3D, las arcadas inferiores tienen una dispersión de 0.017 en la escala del centroide, mientras que las arcadas superiores tienen un valor de 0.023.

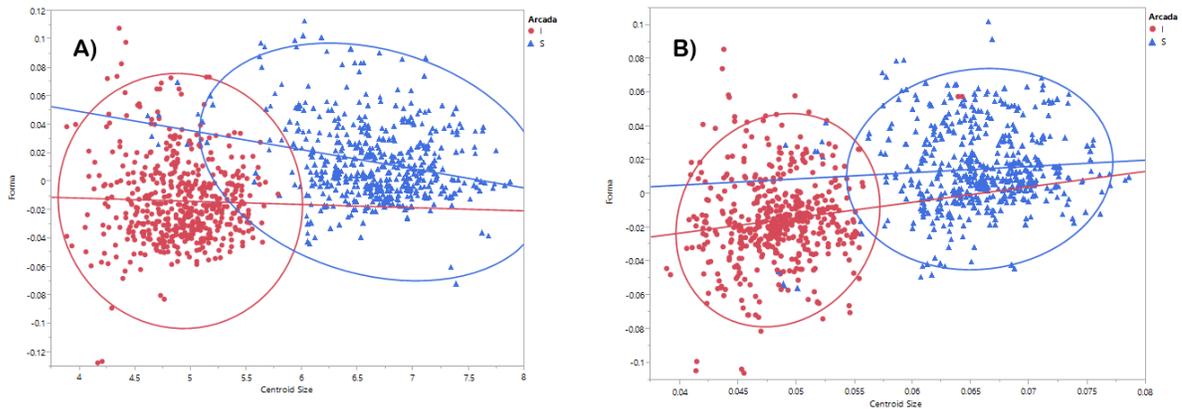


Figura 18. Regresiones de tamaño y forma (componente alométrico) respecto del tipo de arcada. Gráficas de las regresiones de todos los datos donde la variable independiente es el tamaño del centroide y la dependiente es la forma. Se muestran las líneas de ajuste medio de la regresión y las elipses están indicando el 95% de la varianza para cada arcada, los círculos rojos son las arcadas inferiores y en los triángulos azules las arcadas superiores. Igualmente, se graficó la línea de regresión para cada arcada por espacio 2D o 3D. En la imagen A) se encuentran los individuos en 2 dimensiones, mientras que en la imagen B) se encuentran los individuos en 3 dimensiones.

Valores de las regresiones				
	R^2	R^2 ajustado	ECM	p
Arcada superior 2D	0.062804	0.060966	0.026711	<0.0001
Arcada inferior 2D	0.000761	-0.00118	0.029589	0.5317
Arcada superior 3D	0.005054	0.00308	0.024299	0.1102
Arcada inferior 3D	0.016053	0.014093	0.025621	0.0044

Tabla 6. Estadísticos de las regresiones alométricas. Valores estadísticos obtenidos de las regresiones realizadas en el programa JMP11. EMC, error cuadrático médio.

La recta tiene un mejor ajuste en la arcada superior para el caso de los individuos 2D y en la arcada inferior para los individuos 3D, sin embargo, el único que tiene un valor significativo de p es la arcada superior en 2D, lo cual indica que es la estructura que mejor explica la relación entre forma y tamaño.

Con el resultado anterior, se evidenció la necesidad de separar la secuencia de análisis por arcada superior o inferior.

De igual forma, los resultados de acuerdo a si eran modelos previos al tratamiento o posteriores, permitieron observar que el tratamiento dental afecta en suma el proceso de relación entre el tamaño del centroide y la forma (Figura 19), haciendo que el patrón alométrico en las arcadas persista, para ambos casos en los espacios 2D y 3D.

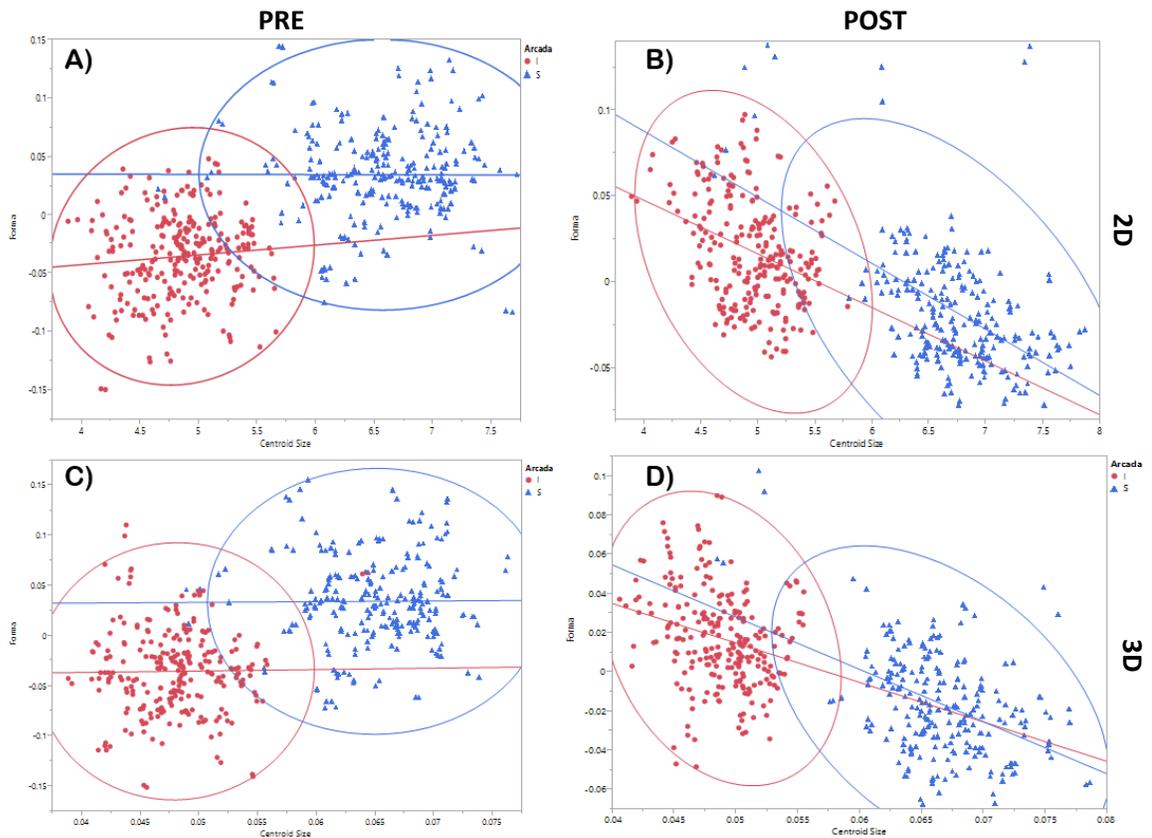


Figura 19. Regresiones previas al tratamiento y posterior al mismo. Gráficas de las regresiones de los datos divididos por tiempo de la toma del molde donde la variable independiente es el tamaño del centroide y la dependiente es la forma. Se muestran las líneas de ajuste medio de la regresión y las elipses están indicando el 95% de la varianza para cada arcada, los círculos rojos son las arcadas inferiores y en los triángulos azules las arcadas superiores. En la imagen A) se encuentran los modelos previos al tratamiento de los individuos en 2 dimensiones, en la imagen B) se encuentran los modelos posteriores al tratamiento de los individuos en 2 dimensiones, mientras que en la imagen C) se encuentran los modelos previos al tratamiento de los individuos en 3 dimensiones, finalmente en la imagen D) se encuentran los modelos posteriores al tratamiento de los individuos en 3 dimensiones.

En este caso se observa que la pendiente de la recta es casi nula para el caso de los modelos de la arcada superior previos al tratamiento para ambas dimensiones. También tiene un valor muy bajo para el caso de los modelos de la arcada inferior previos al tratamiento. Sin embargo, en los modelos posteriores al tratamiento la pendiente de la recta se vuelve negativa para ambas arcadas en las dos dimensiones. De los valores de estas regresiones

(Tabla 7) se vislumbra que la recta tiene mejor ajuste en los modelos posteriores al tratamiento en ambas dimensiones, siendo la arcada superior la que mejor se ajusta. Los modelos posteriores al tratamiento son los únicos que tienen un valor significativo de p para las dos arcadas en ambas dimensiones.

Con el resultado anterior, se evidenció la necesidad de separar la secuencia de análisis por modelos previos y posteriores al tratamiento.

Valores de las regresiones						
			R^2	R^2 ajustado	ECM	p
2D	Previos al tratamiento	Arcada superior	$6.334e^{-6}$	-0.00381	0.038284	0.9675
		Arcada inferior	0.007377	0.003588	0.036287	0.1641
	Posteriores al tratamiento	Arcada superior	0.271003	0.268015	0.031597	<0.0001
		Arcada inferior	0.120049	0.116501	0.029149	<0.0001
3D	Previos al tratamiento	Arcada superior	$5.411e^{-5}$	-0.00382	0.043802	0.9060
		Arcada inferior	0.000176	-0.00373	0.042354	0.8322
	Posteriores al tratamiento	Arcada superior	0.204782	0.201496	0.023689	<0.0001
		Arcada inferior	0.066923	0.063068	0.023974	<0.0001

Tabla 7. Estadísticos de las regresiones alométricas de acuerdo al tratamiento. Valores estadísticos obtenidos de las regresiones realizadas en el programa JMP11 de los modelos previos y posteriores al tratamiento. EMC, error cuadrático medio.

Análisis de forma (shape)

En el ACP, tanto 2D como 3D, se logra observar del mismo modo que el patrón fenotípico de la forma está altamente ligada al tiempo en que se tomó la muestra, es decir si se trataba de un modelo previo o posterior al tratamiento (Figura 20), resultado que se corresponde con lo descrito en la sección anterior de regresiones. Si bien las distribuciones pre y post tratamiento están superpuestas, se observa una reducción dramática de la varianza en ambas dimensiones. En los individuos 2D los modelos previos tienen una dispersión de

0.3 en la escala del PC1, mientras que en los modelos posteriores esta se reduce a 0.2. Por su parte, en los individuos 3D los modelos previos mantienen una dispersión de 0.3 en la escala del PC1, sin embargo, en los modelos posteriores esta se reduce a 0.18.

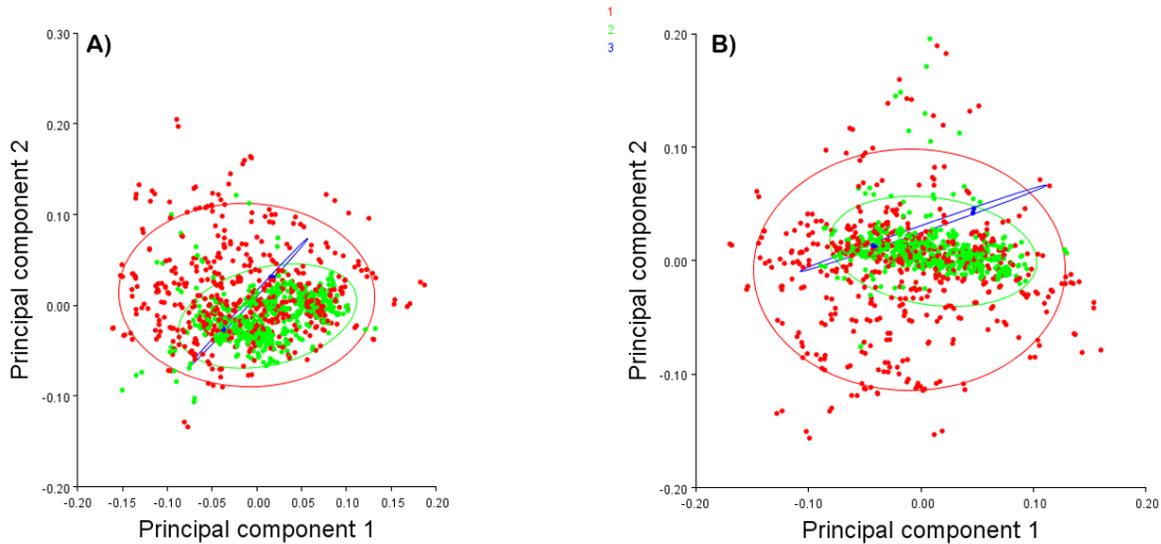


Figura 20. Resultados del análisis de componentes principales para la caracterización hiperdimensional multivariada de las arcadas dentales anteriores. Se presentan las gráficas del PC1 y PC2, los puntos rojos representa los individuos pre tratamiento y en verde los post tratamiento, en azul algunos casos de un tercera toma, como fueron pocos casos no fueron considerados en subsecuentes análisis. Las elipses explican el 90% de la varianza. En la imagen A) se encuentran los individuos en 2 dimensiones, PC1=44.26% y PC2=20.862%, mientras que en la imagen B) se encuentran los individuos en 3 dimensiones, PC1=33.236% y PC2=16.759%.

Este patrón encontrado, en consecuencia, secunda la necesidad de dividir la base de datos general en dos, modelos previos al tratamiento y modelos posteriores al tratamiento, reiterando que las regresiones (Figuras 16-17) sustentan la jerarquización.

Por otra parte, cuando la base de datos fue dividida por arcada superior e inferior, se volvió a observar en el morfoespacio que el tiempo de tratamiento influía mucho en la forma (Figura 21), sobre todo en una reducción de varianza. En los modelos posteriores al tratamiento de las arcadas inferiores se tienen menor varianza por ende en el ACP se traduce a una dispersión menor en los individuos comparado con los de la arcada superior. En el caso de los individuos 2D, específicamente en los modelos posteriores al tratamiento, la dispersión aumenta de 0.12, en la arcada inferior, a 0.15, en la superior, en la escala del PC1. Por su parte en los individuos 3D, la dispersión aumenta de 0.1 en la arcada inferior a 0.15 en la superior.

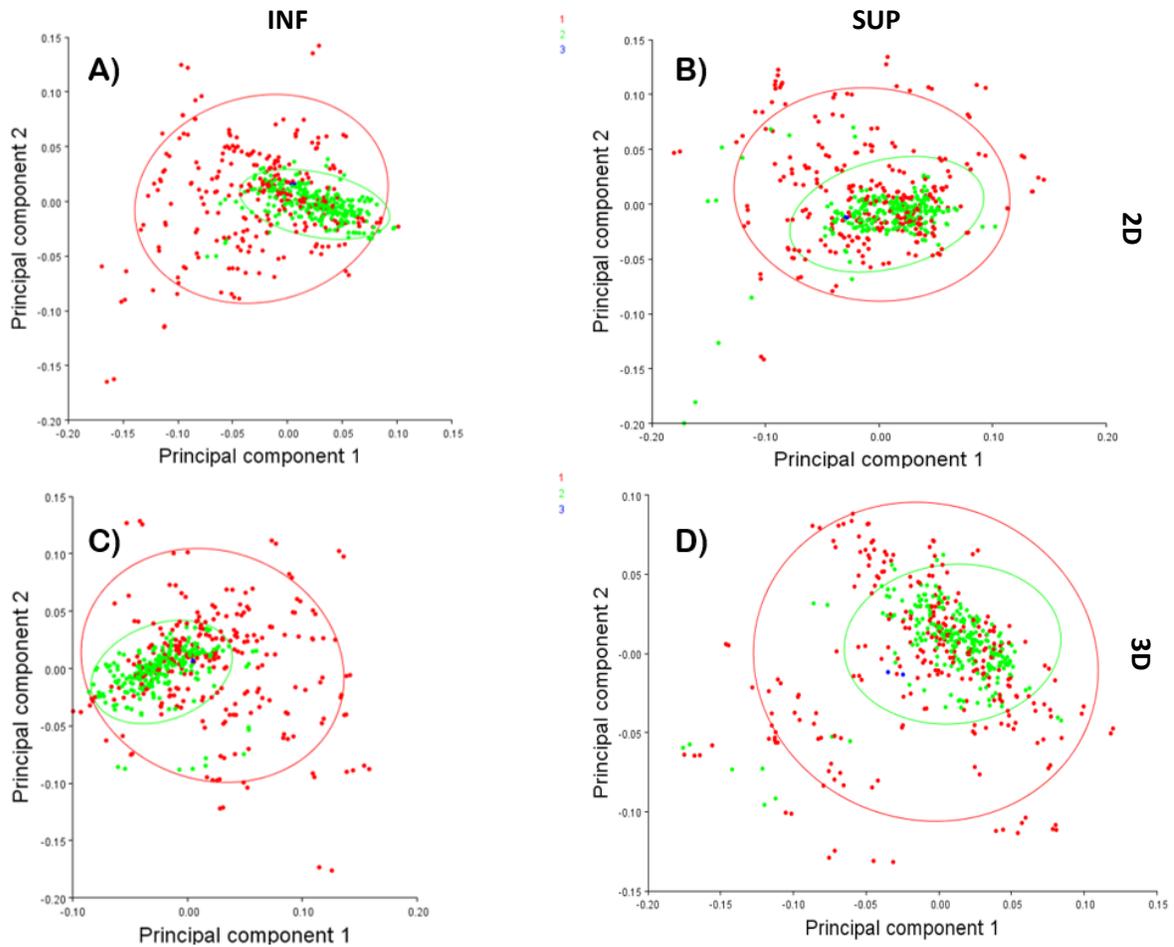


Figura 21. Gráficas del ACP de acuerdo al tipo de arcada. Gráficas del PC1 y PC2 de los datos divididos por tipo de arcada donde las elipses, que explican el 90% de varianza, están indicando los diferentes tiempos en que se tomó el molde, en rojo los modelos previos al tratamiento, en verde los modelos posteriores al tratamiento y en azul el único caso donde se realizó un tercer molde. En la imagen A) se encuentran las arcadas inferiores de los individuos en 2 dimensiones, PC1=40.448% y PC2=17.679%, en la imagen B) se encuentran las arcadas superiores de los individuos en 2 dimensiones, PC1=40.819% y PC2=23.858%, mientras que en la imagen C) se encuentran las arcadas inferiores de los individuos en 3 dimensiones, PC1=30.009% y PC2=17.461%, finalmente en la imagen D) se encuentran las arcadas superiores de los individuos en 3 dimensiones, PC1=29.165% y PC2=18.674%.

Individualización por conglomerado: experimento 2D

El morfoespacio 2D fue analizado por medio de la varianza total del mismo, para ello se calcularon las varianzas para cada espacio, pre y post correcciones de las digitalizaciones (Tabla 8), con la hipótesis de que la varianza aumentara.

Varianza total 2D		
	Pre correcciones	Post Correcciones
Muestra total	0.00758248	0.00780115
Arcada inferior	0.00620703	0.00635420
Pre tratamiento	0.00841012	0.00850905
Post tratamiento	0.00273132	0.00287121
Arcada superior	0.00576616	0.00599851
Pre tratamiento	0.00793340	0.00810070
Post tratamiento	0.00318682	0.00343038

Tabla 8. Varianza calculada en los individuos 2D. Variación total en los individuos en 2 dimensiones, previo a las correcciones en la digitalización y posterior a las mismas.

Vislumbrando los resultados obtenidos al realizar el ACP en todas las bases de datos de los individuos en 2D, se observa que posterior a las correcciones de digitalización la varianza aumento en todos los casos, por ende se tomaron en cuenta estos segundos resultados. Los modelos de la arcada inferior previos al tratamiento son la base que presenta una mayor variación entre los individuos, mientras que la varianza de los modelos de la arcada inferior posteriores al tratamiento son los que tienen el menor valor. La base de datos general 2D, con todos y cada uno de los individuos, es la tercera varianza con mayor valor, estando por debajo de los modelos previos al tratamiento de la arcada superior. Se observa que la arcada inferior cuenta con una mayor varianza en comparación con su antagonista, un valor de 0.00635420 en la inferior comparada con una cifra de 0.00599851 en la superior, además de que en ambos casos los modelos previos al tratamiento presentan una mayor variación, para el caso de la mandíbula es de 0.00850905 mientras que para la maxila es 0.00810070, inclusive mayor que en la base de datos que cuenta con todos los individuos, que tiene un valor de 0.00780115.

Con las coordenadas o valores de los componentes principales, cuyo porcentaje de varianza valor fuera mayor a 1, se calculó el conglomerado o *cluster* con el algoritmo UPGMA, realizando 1000 permutaciones, ello debido a que las computadoras que se emplearon no permitieron aumentar el número de iteraciones, ya que el resultado no convergía (imac, i7, 32GB ram). Los conglomerados o *clusters* resultantes, para las arcadas inferiores, otro para las arcadas superiores, uno más para las arcadas previas al tratamiento y, por último, uno para las arcadas post tratamiento pueden consultarse en el anexo 2. En todos los *cluster* se observa que los agrupamientos a pares están a una distancia aproximada de $5e^{-10}$, además, el método de permutaciones permite explorar cómo esas clasificaciones se mantienen constantes a través de las iteraciones. En este caso la mayoría de los pares

generados está por arriba del 80% indicando que el resultado tiende a persistir y por lo tanto se puede confiar en la veracidad de ese agrupamiento o conglomerado.

Analizando estos *cluster* (Tabla 9) se observa que la mayoría de las bases de datos alcanza un valor de apareamientos correctos por encima del 95% a excepción de los modelos post tratamiento, que cuentan con solo el 92.52% de pareamientos correctos, cuya disminución de varianza hace que los grupos miméticos y apareamientos erróneos aumenten, en 1.97% y 5.51% respectivamente, siendo los valores más altos de todas las bases para este tipo de agrupamiento. Por su parte, la arcada superior tiene mejor pareamiento de grupos correctos que la inferior, de 97.33% y 95.25% respectivamente, en contraste con la varianza que era mayor en la arcada inferior. Los modelos previos al tratamiento son la base con mayor porcentaje de pareamientos correctos, 99.26%, y la única cuyo porcentaje de grupos miméticos es nulo.

Los individuos miméticos (para la totalidad de la muestra n=6, 1.14%) se confirmó eran debido a la similitud de sus arcadas (Figura 22).

Porcentaje de asertividad en individuos 2D						
	Grupos Correctos		Grupos Incorrectos		Grupos Miméticos	
	Pre correcciones	Post correcciones	Pre correcciones	Post correcciones	Pre correcciones	Post correcciones
Todos los individuos	81.75%	95.63%	10.84%	3.23%	7.41%	1.14%
Arcada inferior	79.55%	95.45%	12.12%	3.03%	8.33%	1.51%
Arcada superior	84.73%	97.33%	9.16%	2.29%	6.11%	0.38%
Pre tratamiento	95.56%	99.26%	3.70%	0.74%	0.74%	0%
Post tratamiento	72.05%	92.52%	16.14%	5.51%	11.81%	1.97%

Tabla 9. Asertividad de los modelos 2D. Porcentaje de asertividad en los individuos en 2D calculados con los *cluster*, previo a las correcciones en la digitalización y posterior a las mismas. Siendo el 95% esperado de 526 individuos.

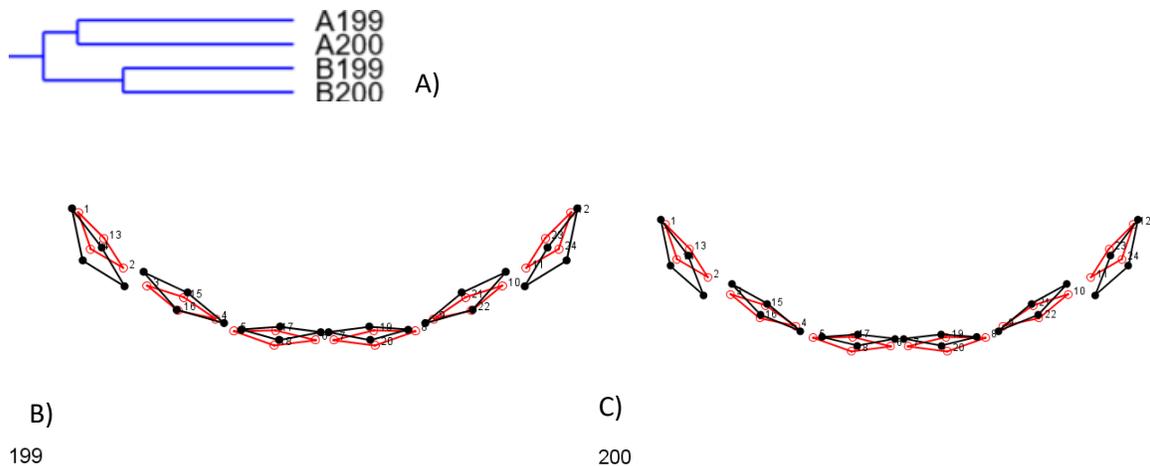


Figura 22. Ejemplo de Grupo mimético de los individuos 2D. Ejemplo de un grupo mimético, donde se demuestra que su morfología es muy parecida. La imagen A) es la agrupación realizada en el *cluster*, mientras que las imágenes B) y C) son el individuo 199 y 200 respectivamente. En estas últimas dos imágenes en rojo se encuentra la forma promedio, por su parte en negro se encuentra la forma del individuo en cuestión.

Individualización por conglomerado: experimento 3D

Por su parte el morfoespacio 3D arroja un patrón de varianza diferente, para el inicio y posterior a la revisión de las digitalizaciones (Tabla 10).

Varianza total 3D		
	Pre correcciones	Post Correcciones
Todos los individuos	0.00944414	0.00940370
Arcada inferior	0.00787362	0.00782364
Pre tratamiento	0.01081968	0.01075250
Post tratamiento	0.00390555	0.00380099
Arcada superior	0.00766268	0.00765354
Pre tratamiento	0.01062471	0.01064226
Post tratamiento	0.00406962	0.00403924

Tabla 10. Varianza total calculada en los individuos 3D previo a las correcciones en la digitalización y posterior a las mismas.

En general el valor es mayor en este caso que en los individuos en 2D, por poner un ejemplo la varianza de todos los modelos es de 0.00940370 en los individuos 3D y de 0.00780115 en los 2D. Las correcciones provocaron que la varianza disminuyera en todos los casos a excepción de los modelos previos al tratamiento de la arcada superior. Los

modelos previos de la arcada inferior son los que presentan una mayor varianza (0.01075250), mientras que los modelos posteriores de la misma arcada son los que presentan la menor varianza (0.00380099). Al igual que el caso anterior la varianza de la arcada inferior es mayor que la superior, solo que en esta ocasión la diferencia es menor, 0.00782364 para la mandíbula y 0.00765354 para la maxila. El patrón persiste y los modelos previos al tratamiento tienen mayor varianza que los posteriores al mismo.

Con el ACP se ejecutó el *cluster* con el logaritmo UPGMA, y se realizaron permutaciones de 1000 iteraciones para asegurarse que el resultado fuera el mismo siempre. Se realizó un *cluster* para todos los datos en 3D, además que debido a la división de las bases de datos se realizó uno para las arcadas inferiores, otro para las arcadas superiores, uno más para las arcadas previas al tratamiento y, por último, uno para las arcadas posteriores al tratamiento (Véase Anexo 3). Se observa que los apareamientos están a una distancia aproximada de $6e^{-2}$, aunado a que en las permutaciones la mayoría de los valores estaba por arriba del 88% indicando que el resultado tiende a persistir y por lo tanto se puede confiar en las agrupaciones realizadas en el *cluster*.

Finalmente, se calculó el porcentaje de asertividad de los individuos 3D, realizado previo a la corrección de las digitalizaciones y posterior a ellas (Tabla 11). Los grupos miméticos se confirmó eran debido a la similitud de sus arcadas (Figura 23).

Porcentaje de asertividad en individuos 3D						
	Grupos Correctos		Grupos Incorrectos		Grupos Miméticos	
	Pre correcciones	Post Correcciones	Pre correcciones	Post Correcciones	Pre correcciones	Post Correcciones
Todos los individuos	90.72%	97.68%	6.58%	1.93%	2.7%	0.39%
Arcada inferior	93.80%	96.9%	3.87%	2.33%	2.33%	0.77%
Arcada superior	91.12%	98.07%	6.95%	1.54%	1.93%	0.39%
Pre tratamiento	94.72%	97.36%	4.15%	2.64%	1.13%	0%
Post tratamiento	88.4%	97.6%	7.6%	1.6%	4%	0.8%

Tabla 11. Asertividad de los modelos 3D. Porcentaje de asertividad en los individuos en 3D, previo a las correcciones en la digitalización y posterior a las mismas, siendo el 95% esperado de 517 individuos

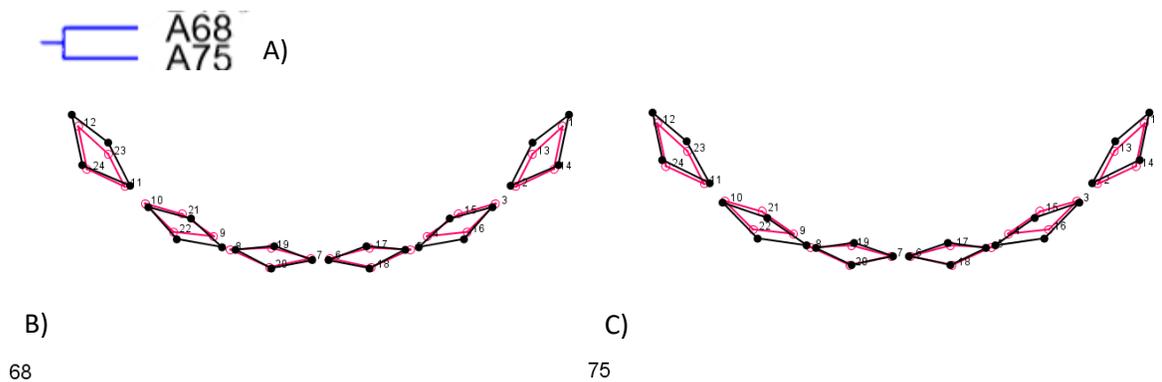


Figura 23. Ejemplo de grupo mimético de los individuos 3D. Ejemplo de un grupo mimético, donde se demuestra que su morfología es muy parecida. La imagen A) es la agrupación realizada en el *cluster*, mientras que las imágenes B) y C) son el individuo 68 y 75 respectivamente. En estas últimas dos imágenes en rojo se encuentra la forma promedio, por su parte en negro se encuentra la forma del individuo en cuestión.

Al realizar los *cluster* se observó que había mayor asertividad al corregirse las digitalizaciones erróneas aunado a que todas las bases se encuentran por encima del 95% de grupos correctamente apareados. En este caso la arcada superior mostro un mayor porcentaje de individuos apareados correctamente.

Encontrándose que la arcada inferior es la que tiene el menor número de apareamientos correctos y el mayor número de grupos miméticos, 96.9% y 0.77% respectivamente, la arcada superior tiene el mayor porcentaje de apareamientos correctos y el menor de apareamientos incorrectos, 98.07% y 1.54% correspondientemente, finalmente, los modelos previos al tratamiento son lo que menor porcentaje de grupos miméticos tiene pero mayor porcentaje de grupos incorrectamente apareados, 0% y 2.64% respectivamente.

Acercamiento 2D y 3D: Reproducibilidad

Finalmente se compararon las salidas de los morfoespacios 2D y 3D mediante una prueba MANTEL, realizada en el programa R con 10,000 permutaciones. Los resultados arrojados fueron un valor de estadístico r de **0.8949**, un valor de *p* de **9.999e-05**.

DISCUSIÓN

Sobre el efecto del error intraobservador en la individualización

Con el diseño para la evaluación del error intraobservador, con las pruebas supervisada y no supervisada se constató lo predicho por los modelos de estudio de error en datos morfométricos. La teoría predice que a través de la generación de repeticiones de un protocolo de medición el factor de error (en este caso el patrón de biodistancia en un morfoespacio y la varianza total) debe disminuir en función del tiempo. En éste sentido, los patrones de varianza total de los morfoespacios mostrada en la figura 13 indican el cambio entre la supervisión de un protocolo de medición, además de cómo la experiencia de las repeticiones ayuda a estabilizar el error a valores despreciables, siempre por debajo de la mínima distancia entre dos individuos de la muestra. La figura 13-A da evidencia de la fluctuación en función del tiempo de un observador no entrenado, y la figura 13-B cuando se ha sistematizado su error mediante la revisión de resultados de la prueba no supervisada. Ello da cuenta de cómo la evaluación del error en un cualquier informe o dictamen forense es de suma relevancia, además del entrenamiento y/o capacitación en el conocimiento de protocolos de *landmarking*. Como complemento, observando los morfoespacios (ACP) se puede ver que se logra discriminar bien a cada individuo a través de las digitalizaciones, aunque los individuos cuatro, siete y nueve se encuentran sus varianzas superpuestas (Figura 11), lo que podría explicarse por errores de medición, estos errores en la medición son los que reportó Yezenirac (Yezerinac et al., 1992), dado que estos errores hacía que disminuyeran las oportunidades de encontrar una diferencia entre los grupos, o por el contrario que aparecieran similitudes que en realidad no están presentes en la estructura. En el caso de las primeras repeticiones es bastante entendible, puesto que era el primer ensayo con el protocolo de Kieser y se estaba adecuando al mismo (Muñoz-Muñoz & Perpiñán, 2010). Además, la figura 11-B, permite vislumbrar que todos los individuos se discriminan entre digitalizaciones. Sin embargo, el hecho de que la repetición cuatro se encontrara alejada del resto da incertidumbre y nociones que esta repetición presenta problemas en su digitalización. Por ello, al analizar la distancia de Mahalanobis y de Procrustes (Anexo 1, Figura 1.2) se vislumbró que no era la misma en ambos casos, indicador de que los errores de medición exacerbaban tanto las diferencias entre las digitalizaciones que esto generaba los patrones en los análisis realizados en esta prueba no supervisada. Para reafirmar esto, se observó en la figura 13-A que la varianza no tenía un decrecimiento constante, lo que provoca

disrupciones en la gráfica y por ende lleva a confirmar los problemas de digitalización en la prueba.

Una explicación de dicho fenómeno es que en citadas repeticiones el lapso de tiempo no fue constante entre digitalizaciones y por ello la varianza aumento en estas (Yezerinac et al., 1992). Las repeticiones posteriores a la cinco se comportan de la manera esperada, descendiendo la varianza conforme avanzaban las repeticiones.

Debido a estas inconsistencias, fue que hubo necesidad de realizar una segunda prueba de error meses después, esta vez ya supervisada dado que ya se estaba más familiarizado con el protocolo, se tenía asesoría constante, aunado a que se exigió tener intervalos de tiempo no alterados. En la figura 12-A se observaron elipses, de cada grupo de individuos, de menor tamaño lo que indica que la varianza en las digitalizaciones del mismo individuo es muy poca entre cada digitalización. Sumado a que la distancia fenotípica entre los individuos es más evidente (más discriminante), esto se distingue en la ubicación de los individuos en el morfoespacio. Mientras que en la figura 12-B hay mejor unión de las iteraciones por ende en el CVA se observan las elipses más unidas, a excepción de la digitalización uno que sigue estando separada del resto. No obstante, si comparamos la distancia en el morfoespacio que existe en la prueba no supervisada y la supervisada se observa que en la segunda prueba la repetición uno está alejada del resto por una magnitud de cuatro, dando a entender que esta prueba supervisada tiene mejores resultados ya que las magnitudes, en distancia, redujeron de 12 a 4 en el CV1.

En esta prueba supervisada, existe similitud entre la distancia de Mahalanobis y de Procrustes (Anexo 1, Figura 1.4), indicador de que las diferencias entre las iteraciones de los individuos son menores en este caso y por ende hay mayor cohesión entre ellas. La gráfica de la varianza (Figura 13-B) en la prueba supervisada se comporta de la manera esperada, disminuyendo la varianza en cada repetición conforme el observador se va acostumbrando al protocolo.

Ya comparando ambas pruebas se observan en los ACP (Figuras 11-A y 12-A) una mejor distinción de los grupos en la prueba supervisada siendo la mínima distancia de magnitud 0.04, mientras que en la prueba no supervisada la menor distancia es de 0 en el PC1. En los ACV (Figuras 11-B y 12-B) uno espera la unión de los grupos, por lo que igual se

vislumbra que en la prueba supervisada que la mayor distancia entre conjuntos es de magnitud 11 en el rango del PC1, en contraste con la no supervisada que es de una distancia magnitud 15 en el mismo componente. Finalmente, se puede ver (Tabla 3) que la varianza es mayor en la prueba supervisada, además de que la disminución de la varianza es mayor en esta la prueba, es de 0.0004356 mientras que en la no supervisada es de 0.0002249.

Todo lo anterior indica que el error intraobservador disminuye con el tiempo, siendo que hay un mayor manejo del protocolo por lo cual son más constantes las digitalizaciones en la segunda. Este error explica la razón por la cual al corregir las digitalizaciones de los individuos aumenta las clasificaciones correctas en los *cluster*. La disminución del error de medición era uno de los resultados esperados y por ende se puede confiar en que las digitalizaciones de los experimentos 2D y 3D fueron realizadas con mayor precisión, además de ser una salida importante de control en casos de protocolos de interés y/o aplicación forense.

En comparación con otros estudios, la mayoría de ellos no realiza un estudio para calcular error intra ni interobservador, a excepción de los estudios de Sheets, Kieser y Bush. Esto también se demuestra en un análisis de literatura realizado por Thevissen et al., (2014) para revisar el estado del arte en cuanto al factor único de las arcadas dentales, donde encontró en los artículos revisados que la mayoría de ellos carecen de pruebas de error bien establecidas en sus investigaciones lo cual es un rubro de suma importancia a la luz de la discusión arriba establecida, ya que los porcentajes de clasificación son alterados y al carecer de reporte de error, su fundamento carece de soporte.

Esto es una deficiencia de metodología en estas investigaciones debido a que el error de la técnica siempre debe ser evaluado en los protocolos de morfometría geométrica (Richtsmeier et al., 2002) por algo tan simple como que permite delimitar los *landmarks* a evaluar dependiendo de los puntos que muestren menor error. Se debe poner en duda la veracidad de los trabajos que no consideran el error llegando al extremo de invalidarlos por tener resultados tendenciosos (Muñoz-Muñoz & Perpiñán, 2010), ya que el error de medición puede modificar la varianza con ello dando falsas interpretaciones del análisis de forma de una estructura confundiendo error con variación biológica (Arnqvist & Martensson, 1998). Específicamente en el ámbito forense, se ha analizado cada vez más esta área con la intención de presentar ante los jueces resultados con sustento científico y con el menor error posible,

dándole así peso a la evidencia presentada. Por ello se ha encontrado en los estudios de error una esfera de oportunidad para darle mayor calidad a las prácticas forenses, ya que es poco estudiado en las investigaciones de esta área y puede tener grandes consecuencias como una asociación errónea (Budowle et al., 2009).

Por ende se hará hincapié en los estudios que si realizaron pruebas de error, empezando por Kieser (Kieser et al., 2007) quien realizó una prueba de error intraobservador digitalizando dos veces 20 mandíbulas con un intervalo de una semana, analizando sus resultados mediante un análisis de deformación relativa (*relative warp analysis*) y comparando el valor de cada espécimen usando un coeficiente de correlación intraclass (CCI). Este análisis arrojó un valor de CCI de 0.95 con un *p value* significativo de 0.01, indicando una consistencia en el error intraobservador y por ende un error intraobservador despreciable.

Por su parte, Bush (Bush et al., 2011a) calculó el error de medición mediante la repetición de un individuo, sin especificar cuantas veces realizó dichas repeticiones, determinando la dispersión de las distancias de *Procrustes* y calculando con ellas la dispersión de la raíz cuadrada de la distancia promedio sobre la media, lo cual es traducible a una desviación estándar. El resultado de su prueba fue un error de medición promedio del 6%, valor que está por encima del rango de error intraobservador permitido (ver Singleton, 2002). Finalmente, Sheets (Sheets et al., 2013) digitalizó diez veces 6 individuos, 3 modelos de mandíbula y 3 de maxila, y con ello realizó una metodología parecida a la de Bush, su análisis arrojó un error de medición del 2%, que está dentro del rango aceptable (sensu Singleton).

Con esto en mente, queda claro que no hay un protocolo a seguir en estas investigaciones para calcular el error, no concordando con un método ni con un número de individuos o repeticiones a realizar. Por ende, en este experimento se establecieron una serie de pasos para mejorar la estimación del error, estas mejoras son realizar mayor número de repeticiones y realizar dos pruebas de error a lo largo del estudio (supervisada y no) para observar como este iba disminuyendo conforme el observador se adecuaba al método, confiando más en las digitalizaciones realizadas. Vislumbrándose de manera clara que el error disminuía hasta que la varianza fuera constante y por ende las digitalizaciones más acercadas a la forma real de la arcada.

Caracterización de la variación de la arcada dental anterior mediante modelo hiperdimensional multivariado.

En la primera revisión de los errores de digitalización, mediante la herramienta *Outliers* del *software Morpho J*, no se encontraron errores de digitalización pero si individuos que se encontraron fuera del rango de variación individual, es decir bastante alejados de la forma promedio (*average shape*), ocasionado por la morfología de los individuos estudiados. Este proceso de validación es de suma importancia, porque elimina la subjetividad de eliminar a un individuo de la muestra, ya que puede ser verificado mediante la observación directa de su morfología y asegurar que se trata de una variación dental anterior normal.

En cuanto a las regresiones, se observa que el tamaño del centroide es la variable que mejor explica el patrón en ambas dimensiones (2 y 3D), dando a entender que existe un patrón alométrico que persiste sin importar la dimensionalidad. En segundo lugar se encuentra la edad del individuo analizado, que de igual manera está relacionado con la morfología de las arcadas mostrándose que el patrón de forma dental anterior tienden a aumentar cambiar de forma en cuanto se pasa de dentición decidua a permanente (6 a 12 años). En esta muestra se analizaron personas entre 9 y 64 años.

Esto se repite para las otras dos variables analizadas, sexo y duración del tratamiento, que son los efectos menores en el modelo, aunque en el caso del sexo únicamente es significativo para los modelos 3D (Tabla 5). Se entiende entonces que, aunque si afectan en la variación de las superficies incisales de los dientes anteriores, su relevancia no es principal. No obstante, parece que el sexo es una variable que si es significativa para los individuos, indicando que el dimorfismo sexual puede ser una variable explicada únicamente por la tercera dimensión de los modelos.

En el caso de los estudios previos, únicamente Kieser (Kieser et al., 2007) y Sheets (Sheets et al., 2011) analizan el tamaño, forma y sexo de los individuos de sus estudios, mientras que el resto de los estudios se enfocan simplemente a encontrar similitudes y apareamientos entre los grupos de arcadas dentales para determinar su factor único. Del mismo modo que el presente trabajo, Kieser y Sheets determinan que el sexo es una variable que no muestra demasiada relación con la forma de las arcadas por lo que tampoco hacen

mucho hincapié de esta en sus estudios; así mismo concuerdan con que la varianza entre las arcadas dentales aumenta si se toma en cuenta la forma y tamaño al mismo tiempo. Sin embargo, Sheets considera la variable que tiene mayor efecto sobre la forma es la curvatura de la arcada.

En el presente trabajo se tomaron en cuenta más variables para observar cuál de ellas era que tenía mayor influencia sobre la forma de las arcadas, este simple hecho demostró que todas las variables juegan un papel sobre la forma, no obstante, el tamaño es la variable con mayor peso y que explica la mayoría de la variación en esta estructura. Es así como no se da por sentado el efecto de las variables en la estructura, sino que no tienen mucho peso estadístico y por ende se decidió no considerarlas para el estudio. Más estudios enfocados a conocer la variación respecto de grupos de edad y sexos podrán ayudar a comprender mejor estos patrones de variación fenotípica.

Tamaño

Se comprobó que existe un patrón alométrico, es decir una dependencia lineal entre el tamaño del centroide y la forma de la arcada dental anterior, indicándose que las arcadas inferiores suelen ser de menores dimensiones que las superiores y que además tienen una dispersión (varianza) menor en comparación con sus antagonistas, patrón que persiste en ambas dimensiones (2D y 3D). Lo anterior nos indicaría que la varianza es menor en el caso de las arcadas inferiores y por lo tanto tienen una uniformidad en la estructura, por ende, hay más posibilidades de encontrar mimetismos en esta estructura, punto a considerar en la praxis antropológica forense. Además es importante decir que existen diferencias entre el acercamiento 2D a 3D respecto de las pendientes de la regresión, donde en el 2D son negativas y positivas en 3D.

Que el tamaño de las arcadas superiores sea mayor que el de su antagonista puede ser vislumbrado de mejor manera con este modelo, demostrando que además existe mayor varianza, explicado quizá por los dientes superiores que tienden a ser de mayores proporciones y que las reglas de la normoclusión indican que la posición de la arcada superior sobresale respecto a la arcada inferior. Esta noción ya había sido reportada previamente, en los estudios de Chaud, Di Carlo, y Martínez, (1993) quien realizó una serie de medidas en

arcadas deciduas y observó que las arcadas superiores suelen ser transversalmente de mayor tamaño que las inferiores.

En las regresiones específicas (Figura 19), divididas por el tratamiento, se observa cómo cambia la forma de las arcadas y la pendiente de la regresión el hecho de contar o no con esta variable. Sin embargo, se vuelve a comprobar que las arcadas superiores son de mayor tamaño que las inferiores, aunado a que se demuestra que los modelos posteriores al tratamiento tienen una forma más uniforme que los previos al tratamiento, por ende disminuye la varianza e individualidad de esta arcada.

Además en las regresiones se observa que algunos individuos no están colocados dentro de las elipses correspondientes a la arcada contraria, es decir son individuos *outliers*, se realizó la revisión de dichos individuos y se constató que tienen un tipo de mordida clase III, es decir que son prognatas, y que además se encuentran en los puntos extremos más alejados de la media. Por ende, esta alteración en el tamaño de las arcadas de acuerdo a su mordida hace que se coloquen en la elipse de la arcada contraria, punto a considerar para recomendaciones protocolares de identificación humana.

Estudios previos (Miller, Vela, & Levy, 2016) proveen evidencia de que existen patrones de variación en individuos con maloclusión clase II y III, encontrando que la alometría está relacionada con el tipo de mordida, fenómeno identificado aquí. Además de que la mandíbula de los individuos con mordida clase III tienen mayor efecto en su antagonista que la que pudiera tener la maxila de un individuo clase II en la mandíbula. Es de suma importancia aclarar que en el espacio de forma, analizado con un ACP de acuerdo al tipo de mordida (Figura 24), hay un efecto de acuerdo al tipo de mordida, existiendo una relación entre el tipo de mordida según Angle y la morfología de la arcada anterior. Demostrando que a pesar de que la clasificación del tipo de mordida según Angle se basa en los primeros molares, tanto superior como inferior, también repercute en los dientes anteriores, viéndose afectadas variables como el tamaño del centroide y la forma. No obstante, dicho análisis escapa de los objetivos del proyecto por lo cual no se profundizó en ellos, pero da apertura a nuevos enfoques analíticos posteriores, donde se evalué desde una perspectiva de modularidad la relación entre este fenómeno. Se muestran aquí los resultados preliminares como una forma de constatar este efecto dentro de protocolos de identificación humana.

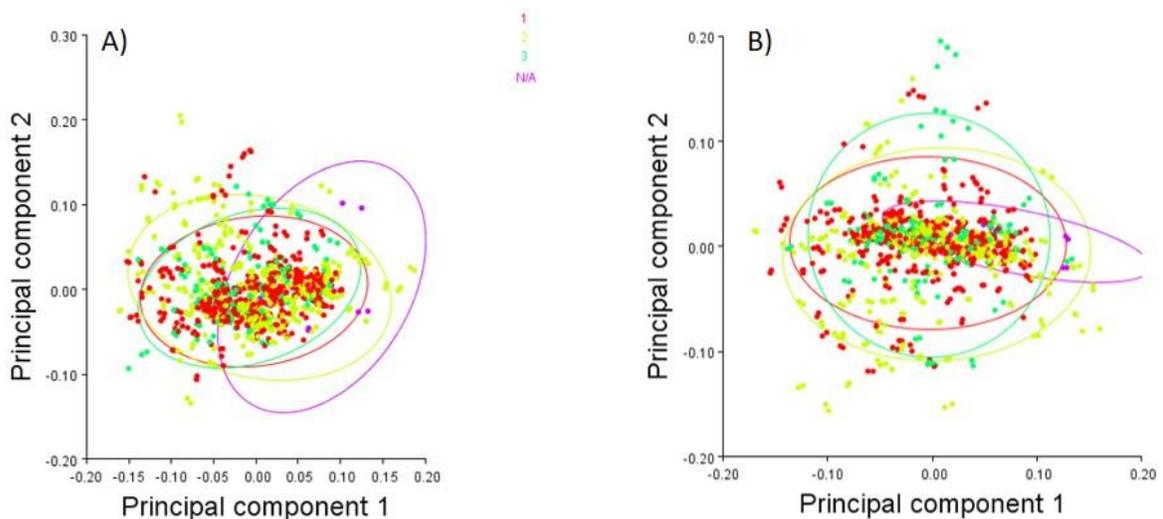


Figura 24. ACP de acuerdo al tipo de mordida del individuo. ACP realizado donde el clasificador de interés es el tipo de mordida, siendo que de rojo se encuentran los individuos con mordida clase I, con amarillo los individuos con mordida clase II, con verde los individuos con mordida clase III y con morado los individuos que se desconocía esta información. Las elipses explican el 90% de la varianza. La imagen A) son los modelos en dos dimensiones, PC1=44.26% y PC2=20.862%, mientras que en la imagen B) se encuentran los individuos en 3 dimensiones, PC1=33.236% y PC2=16.759%.

Un último punto a discutir es analizar cómo la recta en la regresión del tamaño y la forma se comporta si es observada sin un clasificador de arcada (superior e inferior). Luego entonces, se observó que el ajuste lineal es erróneo si no se hace diferencia entre las arcadas (Figura 25), explicando de una manera equivocada cómo se comportan los datos. En la figura 25 se observa que la pendiente de las arcadas, en color rojo y azul, es de valor negativo, mientras que cuando no se toma en cuenta el tipo de arcada tiene una pendiente positiva, en verde. Constatando que para el modelo identificador de las arcadas dentales es relevante saber de qué tipo de arcada se trata para una correcta predicción y que en estudios forenses es de importancia la diferenciación de la arcada para el dictamen antropológico y/u odontológico forense.

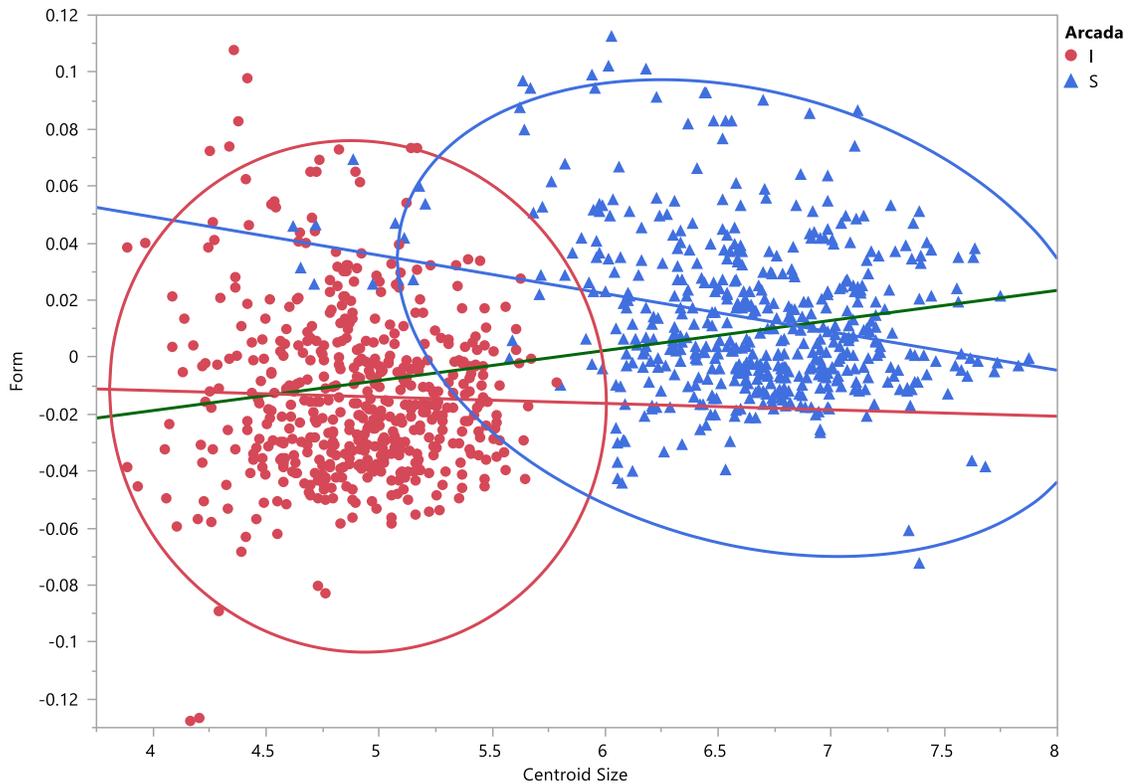


Figura 25. Regresión de los individuos en dos dimensiones con rectas de acuerdo al tipo de arcada. Regresión realizada para observar la pendiente de la recta de acuerdo al tipo de arcada que se tratase, superior o inferior, y otra pendiente sin considerar dicha información. Las elipses explican el 90% de la varianza, los círculos rojos son los modelos de la arcada inferior, mientras que los triángulos azules son de la arcada superior.

Sobre el análisis de forma (shape)

El morfoespacio de forma permitió conocer que el patrón de diferencias morfológicas entre el tiempo de tratamiento tiene también cabida en este espacio, es decir se puede asegurar que el tratamiento repercute en tamaño del centroide y forma (figura 20), independiente de su dimensionalidad, que persiste en ambas dimensiones, expresado en que los modelos posteriores al tratamiento de ortodoncia tienen una menor dispersión en la gráfica y por ende una varianza menor que los modelos sin tratamiento, aunado a que se comprueba, en la figura 21, que esta tendencia permanece a pesar de dividir las bases en arcada superior e inferior.

Se demuestra además que la arcada superior sería más adecuada para individualizar un sujeto de otro, a pesar de que contara con un tratamiento de ortodoncia debido a que hay mayor varianza ocasionado por la dispersión de los individuos en los ACP la cual es mayor en esta arcada inclusive después del tratamiento.

Mientras que en general los modelos posteriores al tratamiento disminuyen la varianza y por ende tienden a ser más uniformes, como lo mencionan varios estudios (Bush et al., 2011b; Franco, Willems, Souza, Coucke, & Thevissen, 2017; Sheets et al., 2011) ello reduce la varianza y aumenta la posibilidad de coincidencia entre personas no relacionadas, por lo que este tipo de modelos deben ser estudiados con mayor precaución. Luego entonces, en casos forenses es de suma importancia explorar, durante las entrevistas a familiares, los tratamientos dentales que el familiar pudo tener durante el transcurso de su vida.

La disminución en la varianza de acuerdo al tratamiento es debido a que al alterarse la forma con los aparatos de ortodoncia se busca un estándar estético y/o funcional. Ya que como lo mencionan Lorenzo U, Cabo G, Gutiérrez R, Grau L, y Otaño L, (2011) se usa la proporción áurea para establecer el tratamiento a seguir y conseguir un resultado tanto estético como funcional, el cual ya tiene estándares definidos ocasionando la disminución de la variación en las arcadas. Lo que se desconoce es el protocolo que usa como estándar el departamento que donó estos modelos, por lo cual al momento de la realización de este manuscrito no se tienen más datos para realizar alguna otra exploración.

Sin embargo, tanto en este estudio como en el de Kieser (Kieser et al., 2007), quien ocupó únicamente individuos posteriores a un tratamiento de ortodoncia por tener menor varianza, se comprobó que a pesar de que se disminuye la varianza con los tratamientos, la individualización es posible con un porcentaje de pareamiento adecuado (Tabla 9 y 11).

Individualización por conglomerado: Experimento 2D

Secundando lo anterior, en el análisis de varianza (Tabla 8), se demuestra cuantitativamente que los tratamientos de ortodoncia disminuyen la varianza en los individuos en el espacio 2D. Igualmente, la arcada inferior tiene mayor varianza que la superior, indicando que esta estructura debe tener más peso en la individualización; e inclusive mayor que si no se discrimina de acuerdo al tipo de arcada. Resultado ya descrito por Sheets, quien observó que la correlación entre la forma y el ancho de la arcada daba como resultado una mayor varianza en la arcada inferior (Sheets et al., 2013).

Al realizar los *cluster* se planteaban realizar 10 000 permutaciones, sin embargo, el tiempo de maquina era excesivo y en la mayoría de los casos el procesador no podía con

aquel comando por lo que a la mitad de la acción se detenía informando que ya no había memoria disponible para terminar la acción. Por ello, y pensando en los recursos de una oficina de identificación humana, se disminuyeron el total de permutaciones a realizar a 1000, factor que no altera el resultado final (ver Adams et al., 2004 y Figura 3). En esta parte se realizó otra revisión y corrección de digitalización debido a que se mostró que los valores de grupos miméticos eran bastante altos y se quería corroborar que fuera por la varianza de las estructuras y no por errores de medición. Se corroboró que si se trataba de un error de digitalización de los *landmark* que exacerbaba los apareamientos erróneos.

La distancia de $5e^{-3}$ encontrada en los *cluster* es un valor sumamente pequeño, dato relevante puesto que lo que uno espera es que la distancia fenotípica sea la menor posible para indicar que estos individuos tienen la mayor relación y similitud entre sí; con la hipótesis de ser agrupamientos correctos. Demostrándose además que la arcada superior es la estructura que da mejores resultados para la individualización morfométrica y que el tratamiento si reduce la varianza de la estructura y con ello aumenta los grupos miméticos, disminuyendo los pareamientos correctos.

El análisis de pareamiento es una mejora de los estudios previos (Sheets et al., 2013), ya que solo indicaban la posibilidad de encontrar una coincidencia entre los individuos analizados conforme se aumentaba la base de datos, sin embargo no indicaban el valor exacto de esta coincidencia, caracterizada en este trabajo de tesis como grupos miméticos (Tabla 9).

Individualización por conglomerado: Experimento 3D

En el morfoespacio 3D también la varianza disminuyó posterior a las correcciones de la digitalización, igualmente originado por errores de medición, lo que permite argumentar que el proceso de control del error es de suma importancia, por medio de la exploración de datos *outliers*.

Respecto del análisis *cluster* se vislumbra que en este caso los pareamientos se encuentran a una distancia fenotípica de $1.5e^{-2}$, el cual es un valor pequeño pero no menor que en el experimento en dos dimensiones significando que debido a la tercera dimensión aumenta la disimilitud entre los datos sin importar que sean los mismos individuos.

Al calcular la asertividad todas las bases (tabla 11) se vislumbra que la totalidad de ellas se encuentran por encima del 95%, lo cual era uno de los resultados esperados. Sin embargo, los patrones persisten siendo la arcada superior la que mejor porcentaje de pareamientos correctos tiene junto a los modelos previos al tratamiento, aunque se distingue de los modelos 2D debido a que la base de datos general, tiene un porcentaje de pareamientos correctos alto, 97.68%, siendo la segunda base con mayor porcentaje correcto en los individuos 3D.

Acercamiento 2D y 3D

Al compaginar los individuos 2D y 3D para observar la asertividad del método se observó lo siguiente (Tabla 12).

Modelos compaginados	Porcentaje
Coincidencia de ambos modelos (los modelos 2D que coinciden con los 3D)	98.29%
Clasificación correcta (mismos individuos en ambos experimentos)	95.3%
Grupos mal apareados (en conjunto en ambos experimentos)	1.34%
Grupos miméticos (en ambos experimentos)	3.36%

Tabla 12. Asertividad comparada de los métodos. Modelos compaginados dando como resultado la asertividad del protocolo para individuos tanto en 2D como en 3D.

Al comparar ambos experimentos se observa que únicamente el 98.29% de los escaneos corresponde con los mismos individuos de las fotografías (n=508), siendo así que el porcentaje de apareamientos correctos para toda la muestra, en ambos tipos de modelos, se traduce al 95.1% (n=483), es decir clasificación correcta del mismo individuo tanto en la digitalización 2D y 3D. Los grupos miméticos y apareamientos incorrectos indican la posibilidad de encontrar una coincidencia entre dos individuos diferentes, lo que se vislumbra como 3.36% (n=17) y 1.34% (n=7) correspondientemente. Esto indica la validez del método y le da certeza a los resultados realizados con este protocolo.

Sin embargo, en general el experimento en 3D tuvo mayor asertividad que el experimento en 2D. Sheets (Sheets et al., 2013) concuerda con esta aseveración, dado que el

aumento de una dimensión más disminuye la posibilidad de coincidencias entre individuos no relacionados, es decir el mimetismo.

El último paso del proceso fue realizar un test de Mantel, el cual arrojó un valor de p de $9.999e-05$, con el cual se rechazaba la hipótesis nula de desigualdad. Por lo tanto, se puede decir que existe una igualdad entre ambos experimentos, es decir que los dos nos dan resultados confiables, exactos y con valor estadístico suficiente para la individualización de las arcadas dentales. Esto es de suma relevancia para el campo, puesto que para un perito siempre será más sencillo obtener una fotografía de la arcada que un escaneo de superficie de la misma, y con este trabajo se demuestra que ambos dan buenos resultados.

En resumen, los resultados aquí presentados contrastan con los expuestos por otros autores que usan métodos de morfometría geométrica; concuerda con las conclusiones de Kieser (Kieser et al., 2007) puesto que de igual manera se confirmó que las superficies incisales de los dientes anteriores son una variable individualizante y única en los sujetos de estudio, aun a pesar de que los tratamientos de ortodoncia aumentan la posibilidad de mimetismo y grupos mal apareados (Franco et al., 2017), en contraste con el estudio de Sheets (Sheets et al., 2011) quien encontró un mimetismo del 42.7%, lo que él llama probabilidad de coincidencia, en los modelos que cuentan con un tratamiento, valor bastante elevado si se compara con el 0.8% de mimetismo en los modelos 3D de la investigación presentada. Aunado a que el estudio en individuos en tres dimensiones disminuye la posibilidad de coincidencia, para este estudio grupos miméticos, comparado con los modelos en dos dimensiones (Bush et al., 2011a) que se observa en los resultados obtenidos comparando el 1.14% de grupos miméticos, en las fotografías de este proyecto, con el 0.39% de los escaneos de superficie de los mismos modelos. En este mismo estudio de Bush encontró que la arcada superior tenía menor número de grupos miméticos comparada con su antagonista, lo que concuerda con lo encontrado en este experimento realizado tanto para los individuos 2D y 3D.

Por todo lo anterior, la presente investigación confirma la hipótesis planteada y valida el método propuesto por Kieser en la muestra mexicana de estudio, trayendo consigo mejoras al mismo. Ya que se demuestra que las superficies incisales de los dientes anteriores sirven para individualizar sujetos con un mayor porcentaje de apareamientos correctos, se realizaron dos pruebas de error a través del experimento para ver cómo se reducía los errores de

medición con la adecuación del observador al protocolo, se toma en cuenta modelos con ausencia dental debido a que es un factor de ayuda en las investigaciones forenses, la muestra es de gran tamaño y con ello se puede corroborar que la coincidencia entre individuos si existe pero en un porcentaje bajo, además que, se realiza una validación del método tanto en fotografías como escaneos para probar que el protocolo es aplicable en ambos casos. Aunado a que no se conoce a la fecha un estudio de la misma índole, que ponga en tela de juicio si las arcadas dentales sirven para individualizar un sujeto con sustento estadístico, específicamente para la población mexicana. Por ende, este estudio apoya la teoría del factor único en las arcadas, con una muestra y análisis con mayor peso estadístico, basado en los métodos morfométricos y considerando el error de medición.

Todos los futuros proyectos, y el actualmente presentado, no podrían llevarse a cabo sin la colección odontológica de la UNAM, la cual surge a raíz de generar estándares en la población mexicana y que es la primera a nivel nacional cuyos fines son principalmente los forenses. Esta colección cuenta con la ventaja que se poseen las historias clínicas del individuo al que se le tomo el modelo, información que se ignoraba en algunos estudios revisados, dando así mucha información vital para realizar investigaciones de calidad, además, se cuentan con los modelos previos y posteriores a un tratamiento de ortodoncia por lo cual puede observarse como se modifica la varianza por ello. Es debido a esta colección que se puede avanzar en la investigación de nuevos métodos forenses y validación de técnicas para la identificación de PFSI de la población mexicana, en aras de ayudar en la procuración de justicia de nuestro país.

Gracias a esta investigación se da pie a futuros proyectos, ya que se pueden analizar otras muestras odontológicas para realizar revalidaciones en otras subpoblaciones mexicanas. Es de igual interés que en un futuro este método se pueda emplear en las procuradurías para los casos donde las demás técnicas no son opción por las condiciones de la PFSI. Inclusive se puede realizar un algoritmo creado por *machine learning* que genere un modelo para dar una predicción y con ello observar como individualiza las arcadas dicho modelo, por supuesto esto requiere habilidades específicas en computación, pero es una posibilidad no tan alejada de la realidad. Además que se puede realizar otras investigaciones, con la ayuda de la colección odontológica, derivadas de los resultados mostrados, como generar una comparación por superficie (*mesh*) entre los individuos, con lo cual se mejoraría la

discriminación entre personas. También desde este enfoque podrían analizarse los cambios en la forma con la edad que se demostró también tenía influencia en esta variable o emplear un método de dimorfismo sexual en la muestra para corroborar su validez, ya que el sexo si bien no mostró diferencias en el caso 2D, se demostró que había un efecto en 3D.

Al final de todo, se considera que esta investigación solo fue un primer paso para alcanzar el ideal propuesto, que es generar un protocolo aplicable a las procuradurías y con ello facilitar el trabajo de los peritos en materia de identificación forense. Por ende, más investigaciones tienen que ser realizadas, siguiendo los mismos lineamientos y principios científicos que el trabajo presentado estableció y con ello estandarizar el método.

CONCLUSIONES

Al final de este proyecto, se llegaron a las siguientes conclusiones:

- El método de Kieser es efectivo para individualizar a los sujetos dentro de la muestra de población mexicana estudiada, alcanzando más del 95% de exactitud a excepción de las fotografías de los individuos posteriores al tratamiento.
- El error intraobservador disminuye conforme el observador se va adecuando al protocolo y es de imperativa necesidad su caracterización en el marco de informes forenses.
- El método es efectivo tanto en 2D como en 3D, sin embargo, da mejores resultados de asertividad en los escaneos de superficie (3D).
- El tamaño está directamente relacionado a la arcada superior o inferior, así como la forma a la acción de tratamientos dentales con los aparatos de ortodoncia. Siendo relevante hacer una separación de estos para una mejora en el proceso de identificación.
- La arcada inferior muestra mayor varianza, no obstante, la arcada superior tiene un mejor porcentaje de asertividad.
- Los modelos previos a los aparatos de ortodoncia son más efectivos para individualizar a los sujetos de la muestra.
- A pesar de que se cuente con un tratamiento de ortodoncia es posible individualizar a los sujetos con un porcentaje alto de confiabilidad.

REFERENCIAS

- Adams, D C, Rohlf, F. J., & Dennis, E. S. (2013). A field comes of age: geometric morphometrics in the 21 st century Geometric morphometrics and the “Procrustes paradigm.” *Hysterix - Italian Journal of Mammology*, 24(1), 7–14.
- Adams, Dean C, James Rohlf, F., & Slice, D. E. (2004). Italian Journal of Zoology Geometric morphometrics: Ten years of progress following the “revolution” Geometric morphometrics: ten years of progress following the “revolution.” *Italian Journal of Zoology*, 71(1), 5–16.
- Alqahtani, S. J., Hector, M. P., & Liversidge, H. M. (2014). Accuracy of dental age estimation charts: Schour and Massler, Ubelaker and the London Atlas. *American Journal of Physical Anthropology*, 154(1), 70–78.
- AlQahtani, S. J., Hector, M. P., & Liversidge, H. M. (2010). Brief communication: The London atlas of human tooth development and eruption. *American Journal of Physical Anthropology*, 142(3), 481–490.
- American Board of Forensic Odontology, I. (1986). *Guidelines for bite mark analysis*. J Am Dent Ass. J Am Dent Ass.
- Areitio Bertolín, J., & Areitio Bertolín, M. T. (2007). Análisis en torno a la tecnología biométrica para los sistemas electrónicos de identificación y autenticación. *Revista Española de Electrónica*, (630), 52–67.
- Arnqvist, G., & Martensson, T. (1998). Measurement error in geometric morphometrics: empirical strategies to asses and reduce its impact on measures of shape, (January 1998).
- Bailey, R. C., & Byrnes, J. (1990). A New, Old Method for Assessing Measurement Error in Both Univariate and Multivariate Morphometric Studies. *Systematic Zoology*, 39(2), 124.
- Ball, J. (2002). A critique of age estimation using attrition as the sole indicator. *The Journal of Forensic Odonto-Stomatology*, 20(2), 38–42. Retrieved from
- Barraza, S. (2016). Identificación de cadáveres sometidos a altas temperaturas , a partir de las características macroscópicas de sus órganos. *Univ Odontol*, 35(74), 29–38.

- Barrientos, G. (2001). Determinación de la edad de muerte a través de análisis de la altura total de la corona dental en muestras del holoceno temprano del sudeste de la región Pampeana. *Revista Argentina de Antropología Biológica*.
- BBC, M. (2018, September 18). México: escándalo por el tráiler de cadáveres que guardaba más de 150 cuerpos en Jalisco. *BBC News Mundo*. Recuperado de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-45556274>
- Blenkin, M. R. B., & Evans, W. (2010). Age estimation from the teeth using a modified demirjian system. *Journal of Forensic Sciences*, 55(6), 1504–1508.
- Bookstein, F. L. (1996). *BIOMETRICS, BIOMATHEMATICS AND THE MORPHOMETRIC SYNTHESIS*. *Bulletin of Mathematical Biology* (Vol. 58).
- Brace, C. L., & Ryan, A. S. (1980). Sexual dimorphism and human tooth size differences. *Journal of Human Evolution*, 9(5), 417–435.
- Bryan, K. (2013). Análisis de la prevalencia de los rasgos no métricos de las coronas dentales en dentición temporal y permanente Restos óseos relacionados a un contexto. *Canto Rodado*, 8, 155–168.
- Budowle, B., Bottrell, M. C., Bunch, S. G., Fram, R., Harrison, D., Meagher, S., ... Stacey, R. B. (2009). A perspective on errors, bias, and interpretation in the forensic sciences and direction for continuing advancement. *Journal of Forensic Sciences*, 54(4), 798–809.
- Bush, M. A., Bush, P. J., & Sheets, H. D. (2011a). Similarity and match rates of the human dentition in three dimensions: Relevance to bitemark analysis. *International Journal of Legal Medicine*, 125(6), 779–784.
- Bush, M. A., Bush, P. J., & Sheets, H. D. (2011b). Statistical Evidence for the Similarity of the Human Dentition. *Journal of Forensic Sciences*, 56(1), 118–123.
- Byers, S. (2017). *Introduction to Forensic Anthropology* (5th ed.). New York: Taylor & Francis Group.
- Calabuig, G., & Villanueva, E. (2004). *Medicina Legal y Toxicología* (6°). Elsevier Masson SAS.
- Cattaneo, C. (2007). Forensic anthropology: developments of a classical discipline in the

- new millennium. *Forensic Science International*, 165(2–3), 185–193.
- Chaud, A., Di Carlo, E., & Martínez, M. (1993). PATRONES MORFOLOGICOS DE LAS ARCADAS DENTARIAS PRIMARIAS. *REVISTA DE LA FACULTAD DE ODONTOLOGIA UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA*, 23(1), 17–34.
- Christensen, A. M., Passalacqua, N. V., & Bartelink, E. J. (2014). *Forensic Anthropology: Current Methods and Practice. Forensic Anthropology: Current Methods and Practice*.
- Christensen, A., Passalacqua, N. V., & Bartelink, E. J. (2014). *Forensic Anthropology, Current Methods and Practice*. (A. Press, Ed.) (1st ed.). Elsevier.
- Clark, M. A., Sandusky, G. E., Hawley, D. A., Pless, J. E., Fardal, P. M., & Tate, L. R. (1991). Fatal and near-fatal animal bite injuries. *Journal of Forensic Sciences*, 36(4), 1256–1261.
- Cole, S. A. (2009). Forensics without uniqueness , conclusions without individualization : the new epistemology of forensic identification †. *Law, Probability and Risk*, 8(July), 233–255.
- Community Committee on Identifying the Needs of the Forensic Sciences. (2009). *Strengthening Forensic Science in the United States: A Path Forward. National Research Council*.
- Devos, N., & Willems, R. (2009). Objective Tooth Colour Measurements As a Means of Determining. *J Forensic Odontomatol*, 27(2), 2–8.
- Díaz, M. P., María, L., Guzmán, D., Antonio, M., Frías, E., Monserrat, N., & Guardado, H. (2013). Factores intrínsecos de maloclusión dental en Pacientes Con Dentición Permanente, 70(2), 61–67.
- Dirkmaat, D. C., Cabo, L. L., Ousley, S. D., & Symes, S. A. (2008). New perspectives in forensic anthropology. *American Journal of Physical Anthropology*, 137(S47), 33–52.
- Edgar, H. J. H. (2009). Testing the utility of dental morphological traits commonly used in the forensic identification of ancestry. *Frontiers of Oral Biology*, 13, 49–54.
- Edgar, H. J. H. (2013). Estimation of Ancestry Using Dental Morphological Characteristics. *Journal of Forensic Sciences*, 58(SUPPL. 1), 1–13.

- Edgar, H. J. H. (2017). *DENTAL MORPHOLOGY* (1st ed.). New York: Taylor & Francis Group.
- Fernando, Ó. F., & Correa, H. L. (2009). Identificación biométrica utilizando imágenes infrarrojas de la red vascular de la cara dorsal de la mano Biometric identification using infrared dorsum hand vein images. *Revista Ingeniería e Investigación*, 29(1), 90–100.
- Franco, A., Willems, G., Souza, P. H. C., Coucke, W., & Thevissen, P. (2017). Uniqueness of the anterior dentition three-dimensionally assessed for forensic bitemark analysis. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 46, 58–65.
- Furness, J. (1981). A general review of bite-mark evidence. *The American Journal of Forensic Medicine and Pathology*, 2(1), 49–52.
- García Castillo, Z., & Álvarez Cárdenas, A. (2016). *Ciencia Forense en el contexto del Nuevo Sistema Penal*. (A. Pérez, Ed.) (1st ed.). Tribunal Superior de Justicia.
- Garn, S. M., Lewis, A. B., Swindler, D. R., & Kerewsky, R. S. (1967). Genetic Control of Sexual Dimorphism in Tooth Size. *Journal of Dental Research*, 46(5), 963–972.
- Gibelli, D., De Angelis, D., Poppa, P., Sforza, C., & Cattaneo, C. (2017). An Assessment of How Facial Mimicry Can Change Facial Morphology: Implications for Identification. *Journal of Forensic Sciences*, 62(2), 405–410.
- Goodall, C. (1991). *Procrustes Methods in the Statistical Analysis of Shape*. Source: *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* (Vol. 53).
- Grippaudo, C., Paolantonio, E. G., Antonini, G., Saulle, R., La Torre, G., & Deli, R. (2016). Association between oral habits, mouth breathing and malocclusion Associazione fra abitudini viziate, respirazione orale e malocclusione. *Acta Otorhinolaryngologica Italica*, 36, 386–394.
- Gronau, I., & Moran, S. (2007). Optimal implementations of UPGMA and other common clustering algorithms. *Information Processing Letters*, 104(6), 205–210.
- Gustafson, G., & Malmö, D. O. (1950). Age Determinations on Teeth. *The Journal of the American Dental Association*, 41(1), 45–54.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software

- package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 9.
- Herrera Saint-Lu, P., Barrientos, T., Fuentes Santoyo, R., & Alva Rodríguez, M. (2008). *Anatomía Integral*. (Progreso, Ed.) (1°). Ciudad de México: Trillas.
- Hillson, S. (2005). *Teeth* (2nd ed.). Cambridge Manuals.
- Holliday, R. (1994). INTRODUCTION Epigenetics: An Overview INTRODUCTION AND DEFINITION. *Developmental Genetics*, 15, 453-457.
- Houck, M. M., & Siegel, J. (2010). Anthropology and Odontology, Forensic Science. In A. Press (Ed.), *Fundamental of Forensic Science* (Second Edi, pp. 10–15, 203–206). Elsevier.
- Hunter, W. S., & Priest, W. R. (1960). Errors and discrepancies in measurement of tooth size. *Journal of Dental Research*, 39, 405–414.
- Jain, A. K., & Ross, A. (2015). Bridging the gap: From biometrics to forensics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1674).
- Jones, A. V., & Franklin, C. D. (2006). An analysis of oral and maxillofacial pathology found in adults over a 30-year period. *J Oral Pathol Med*, 35(7), 392–401.
- Kieser, J. A., Bernal, V., Waddell, J. N., & Raju, S. (2007). The Uniqueness of the Human Anterior Dentition : A Geometric Morphometric Analysis, 52(3), 671–677.
- Klingenberg, C. (2011). MorphoJ: an integrated software package for geometric morphometrics. *Molecular Ecology Resources*, 11, 353–357.
- Klingenberg, Christian. (2010). Evolution and development of shape: integrating quantitative approaches. *Nature Publishing Group*, 11, 623–635.
- Kumar, A. A., Phillip, A., Kumar, S., Rawat, A., Priya, S., & Kumaran, V. (2015). Digital model as an alternative to plaster model in assessment of space analysis. *Journal of Pharmacy & Bioallied Sciences*, 7(Suppl 2), S465-9.
- Lamendin, H., Baccino, E., Humbert, J. F., Tavernier, J. C., Nossintchouk, R. M., & Zerilli, A. (1992). A simple technique for age estimation in adult corpses: the two criteria dental method. *Journal of Forensic Science*, 37, 1373–1379.
- López-Lázaro, S., Soto-Álvarez, C., Aramburú, G., Rodríguez, I., Cantín, M., & Fonseca, G. M. (2016). Investigación de Rasgos Dentales No Métricos en Poblaciones

- Sudamericanas Actuales: Estado de Situación y Contextualización Forense. *International Journal of Morphology*, 34(2), 580–592.
- Lorenzo U, A. M., Cabo G, R., Gutiérrez R, Á. R., Grau L, I., & Otaño L, G. (2011). Comportamiento de proporciones divinas en mediciones dentales de individuos con normoclusión y maloclusión. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 10(3), 355–371.
- MacFarlane, T. W., MacDonald, D. G., & Sutherland, D. A. (1974). Statistical problems in dental identification. *Journal - Forensic Science Society*, 14(3), 247–252.
- Madi, H., & Swadi, S. (2013). ASSESSMENT OF THE UNIQUENESS OF HUMAN. *JOURNAL of FORENSIC ODONTOSTOMATOLOGY*, 31(1), 30–39.
- Miller, S., Vela, K., & Levy, S. (2016). PATTERNS OF MORPHOLOGICAL INTEGRATION IN THE DENTAL ARCHES OF INDIVIDUALS WITH MALOCCLUSION, 40(4), 1291–1296.
- Moreno, S. M., & Moreno, F. A. (2002). Antropología dental: una herramienta valiosa con fines forenses. *Rev. Estomat*, 10(2), 29–42.
- Muñoz-Muñoz, F., & Perpiñán, D. (2010). Measurement Error in Morphometric Studies: Comparison between Manual and Computerized Methods. *Annales Zoologici Fennici*, 47(1), 46–56.
- Muñoz Barrio, J. E., Gómez García, J., Calvo Guirao, J. L., & Luna Maldonado, A. (2011). Determinación de un eje hipotético en registros incompletos. Su utilidad para la individualización de las marcas de mordeduras humanas. *Revista Espanola de Medicina Legal*, 37(2), 51–58.
- Nadas, J., Putz, Z., Kolev, G., Nagy, S., & Jermendy, G. (2008). Intraobserver and interobserver variability of measuring waist circumference. *Med Sci Monit.*, 14(1234-1010 (Print)), CR15–CR18.
- Neale, W. T., Hessel, D., & Terpstra, T. (2011). Photogrammetric Measurement Error Associated with Lens Distortion. *SAE Technical Paper Series*, 1, 1–54.
- Nelson, A. (2010). *Wheeler's Dental Anatomy, Physiology, and Occlusion*. (Saunders, Ed.) (9°). China: Elsevier.
- Noyes, H. J. (1942). Classification of Malocclusion. *The Angle Orthodontist*, 12(1), 39–46.

- Page, M., Taylor, J., & Blenkin, M. (2011). Forensic Identification Science Evidence Since Daubert: Part I-A Quantitative Analysis of the Exclusion of Forensic Identification Science Evidence. *Journal of Forensic Sciences*, 56(5), 1180–1184.
- Pérez Campos, E., & García Castillo, Z. (2017). *Tópicos Selectos de Ciencias Forenses y Seguridad* (1st ed.). Ciudad de México: CONACYT.
- Perez, F., Rojas, A., Rivas, R., & Aguilar, S. (2011). Estudio comparativo de formas de arco dental en población nayarita utilizando una plantilla convencional y una plantilla propuesta.
- PGR. (2015). *Guía de Especialidades Periciales Forenses* (1st ed.). Ciudad de México: PGR.
- Quesada García, C., & López Palafox, J. (2019). HISTORIA DE LA IDENTIFICACIÓN PERSONAL: DESDE EL RECONOCIMIENTO FACIAL HASTA EL ADN DENTAL. *Revista de La Facultad de Ciencias de La Salud*, 14(1), 1–11.
- Quinto, M., Farrera, A., Gil, I., & Gómez, J. (2017). Morfometría Geométrica aplicada a la antropología y odontología Forense. In E. Pérez (Ed.), *Tópicos Selectos de Ciencias Forenses y Seguridad* (1st ed., pp. 246–253). Ciudad de México: CONACYT.
- Rawson, R., Ommen, R., Kinard, G., Johnson, J., & Yfantis, A. (1984). Statistical evidence for the individuality of the human dentition. *J Forensic Sci*, 43, 245–53.
- Reddy, G., Reddy, V. P., Sharma, M., & Aggarwal, M. (2016). Role of orthodontics in forensic odontology - A social responsibility. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, 10(4), ZE01–ZE03.
- Regalado Ruiz, L. A. (2015). *CAMBIOS ONTOGENÉTICOS DE LOS TEJIDOS DEL ÓRGANO DENTAL HUMANO UNA ALTERNATIVA PARA ESTIMAR LA EDAD CRONOLÓGICA EN UN CONTEXTO ANTROPOLÓGICO Y FORENSE*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO.
- Richtsmeier, J. T., DeLeon, V. B., & Lele, S. R. (2002). The promise of geometric morphometrics. *Yearbook of Physical Anthropology*, 45, 63–91.
- Rodrigo, a G., & Drummond, A. (2000). Reconstructing Genealogies of Serial Samples Under the Assumption of a Molecular Clock Using Serial-Sample UPGMA.

- Molecular Biology and Evolution*, 17(12), 1807–1815.
- Ruiz-Garzón, G. (2013). Bertillon and Galton . Probabilistic arguments related to the identification of criminals. *Boletín de Estadística e Investigación Operativa*, 29(2), 129–140.
- Saks, M. J., & Koehler, J. J. (2008). the Individualization Fallacy in Forensic Science Evidence. *Vanderbilt Law Review*, 61, 199–219.
- Schwartz, G. T., & Dean, M. C. (2005). Sexual dimorphism in modern human permanent teeth. *American Journal of Physical Anthropology*, 128(2), 312–317.
- Scout, G. R., & Irish, J. D. (2013). *Anthropological Perspectives on Tooth Morphology: Genetics, Evolution, Variation*. (1st ed.). UK: Cambridge University Press.
- Sheets, H. D., Bush, P. J., Brzozowski, C., Nawrocki, L. A., Ho, P., & Bush, M. A. (2011). Dental shape match rates in selected and orthodontically treated populations in New York State: A two-dimensional study. *Journal of Forensic Sciences*, 56(3), 621–626.
- Sheets, H. D., Bush, P. J., & Bush, M. A. (2013). Patterns of Variation and Match Rates of the Anterior Biting Dentition : Characteristics of a Database of 3D-Scanned Dentitions, 58(1), 60–68.
- Singleton, M. (2002). Patterns of cranial shape variation in the Papionini (Primates: Cercopithecinae). *Journal of Human Evolution*, 42(5), 547–578.
- Ström, F. (1963). Investigation of Bite-Marks. *Journal of Dental Research*, 42(1), 312–316.
- Sweet, D, & Bowers, C. M. (1998). Accuracy of bite mark overlays: a comparison of five common methods to produce exemplars from a suspect's dentition. *Journal of Forensic Sciences*, 43(2), 362–367.
- Sweet, David. (2010). Forensic dental identification. *Forensic Science International*, 201(1–3), 3–4. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2010.02.030>
- Thevissen, P., Willems, G., Bekkering, G. E., Franco, A., & Souza, P. H. C. (2014). The uniqueness of the human dentition as forensic evidence: a systematic review on the technological methodology. *International Journal of Legal Medicine*, 129(6), 1277–
- Tiol-Carrillo, A., & González-Rodríguez, V. M. (2018). Criterios odontológicos en la identificación forense de subadultos. *Revista ADM*, 75(6), 322–325.

- Torcida, S., & Pérez, I. (2012). Análisis de Procrustes y el estudio de la variación morfológica. *Revista Argentina de Antropología Biológica*, 14(1), 131–141.
- Turner, C., Nichol, C., & Scott, R. (1991). Scoring procedures for key morphological traits of permanent dentition : the Arizona State University dental Anthropology system. *Advances in Dental Anthropolgy*, 13–31.
- Vaidya, S., Ahuja, N., Bajaj, P., Kapoor, C., Sabarwal, R., & Rajpal, K. (2015). Objective measurement of shade color in age estimation. *Journal of Forensic Dental Sciences*, 7(3), 171.
- Vale, G. L., & Noguchi, T. T. (1983). Anatomical distribution of human bite marks in a series of 67 cases. *Journal of Forensic Sciences*, 28(1), 61–69.
- Valera, E. E., Alberto, C., La, M., Gamaza, J. C., Pineda, J., Vallejos, P., ... Benitez, W. (2016). Análisis antropológico dental . A propósito de la presencia del rasgo diente en forma de pala en un individuo en etapa perinatal en el sitio arqueológico Playa Chuao (Ar2), 39–45.
- Vargas, J. A. (2016). Organización e identificación de víctimas de catástrofes. *Medicina Legal de Costa Rica*, 33(1), 110–115.
- Verma, K., Joshi, B. & Joshi, C. (2013). Bite Marks as Physical Evidence from the Crime Scene- An Overview. *Open Access Scientific Reports*, 2(1), 605.
- Verma, A. K., Kumar, S., & Bhattacharya, S. (2013). Identification of a person with the help of bite mark analysis. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 3(2), 88–91.
- Villanueva, M., & Farrera, A. (2015). Crecimiento y desarrollo del perfil facial en una serie de población mexicana. *Estudios de Antropología Biológica*, XVII(1), 105–117.
- White, T., Black, M., & Folkens, P. (2012). *Human Osteology*. (A. Press, Ed.) (3rd ed.). UK: Elsevier.
- Wiley, D., Amenta, N., Alcantara, D., & Ghosh, D. (2005). Evolutionary Morphing. *Science*, 1–8.
- Xantomila, J. (2018, November 13). En once años, casi 2 mil fosas clandestinas halladas: informe. *La Jornada*. Recuperado de

<https://www.jornada.com.mx/2018/11/13/politica/011n1pol#>

- Yezerinac, S. M., Lougheed, S. C., Handford, P., Biology, S., & Dec, N. (1992). Measurement Error and Morphometric Studies : Statistical Power and Observer Experience MEASUREMENT ERROR AND MORPHOMETRIC STUDIES : STATISTICAL POWER AND OBSERVER EXPERIENCE, *41*(4), 471–482.
- Zelditch, M. L., Swiderski, D. L., Sheets, H. D., & Fink, W. L. (2004). Geometric morphometrics for biologists: a primer. *Elsevier Academic Press San Diego*, *95*, 443.

ANEXOS

Anexo 1. Error intraobservador

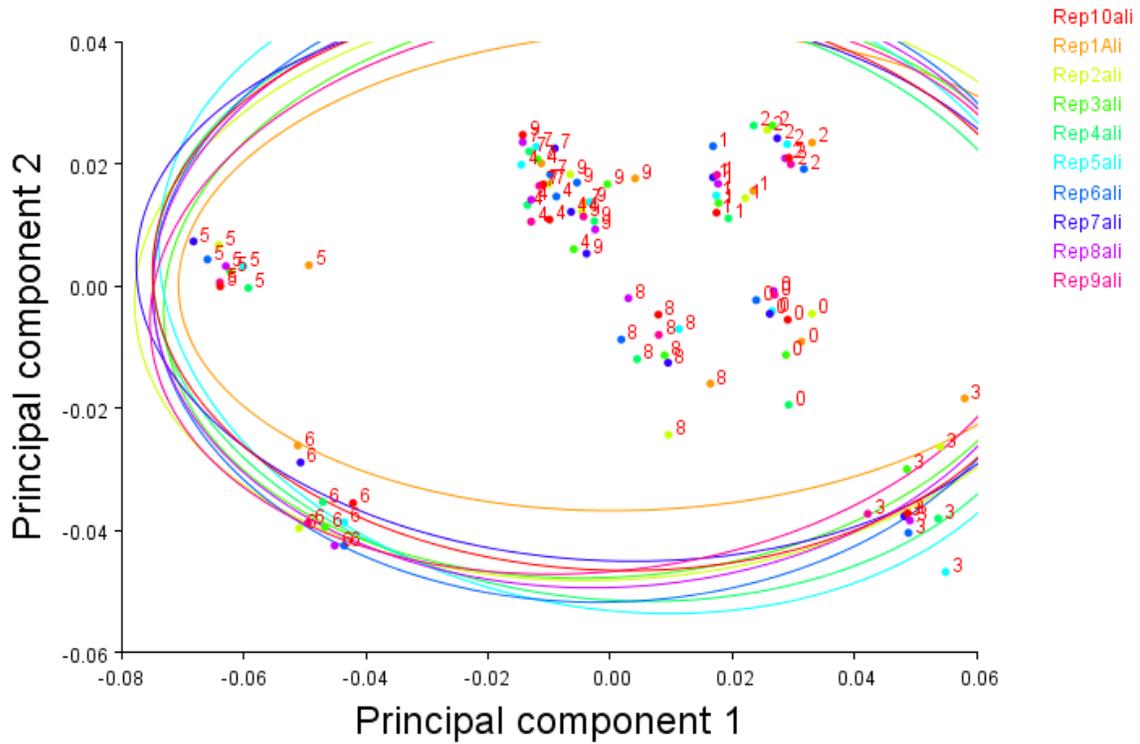


Figura 1.1. Prueba no supervisada donde se observan que las repeticiones se superponen, con elipses que explican el 90% de la variación.

Procrustes distances among groups:

	Rep10ali	Rep1Ali	Rep2ali	Rep3ali	Rep4ali	Rep5ali	Rep6ali	Rep7ali	Rep8ali
Rep1Ali	0.0248								
Rep2ali	0.0081	0.0216							
Rep3ali	0.0065	0.0248	0.0083						
Rep4ali	0.0067	0.0267	0.0101	0.0047					
Rep5ali	0.0047	0.0249	0.0079	0.0060	0.0058				
Rep6ali	0.0038	0.0248	0.0078	0.0065	0.0064	0.0048			
Rep7ali	0.0036	0.0235	0.0078	0.0073	0.0073	0.0040	0.0039		
Rep8ali	0.0038	0.0248	0.0099	0.0080	0.0074	0.0050	0.0047	0.0039	
Rep9ali	0.0040	0.0241	0.0093	0.0073	0.0067	0.0049	0.0049	0.0040	0.0029

P-values from permutation tests (10000 permutation rounds) for Procrustes distances among groups:

	Rep10ali	Rep1Ali	Rep2ali	Rep3ali	Rep4ali	Rep5ali	Rep6ali	Rep7ali	Rep8ali
Rep1Ali	0.2816								
Rep2ali	0.9905	0.4596							
Rep3ali	0.9936	0.2789	0.9890						
Rep4ali	0.9945	0.2205	0.9676	0.9982					
Rep5ali	0.9974	0.3098	0.9909	0.9962	0.9951				
Rep6ali	0.9993	0.3129	0.9927	0.9955	0.9950	0.9965			
Rep7ali	0.9993	0.3634	0.9916	0.9933	0.9942	0.9974	0.9986		
Rep8ali	0.9988	0.3127	0.9759	0.9874	0.9913	0.9946	0.9957	0.9986	
Rep9ali	0.9984	0.3317	0.9830	0.9929	0.9939	0.9970	0.9949	0.9985	0.9995

Figura 1.2. Matrices de distancias de Procrustes y valores p de la prueba no supervisada

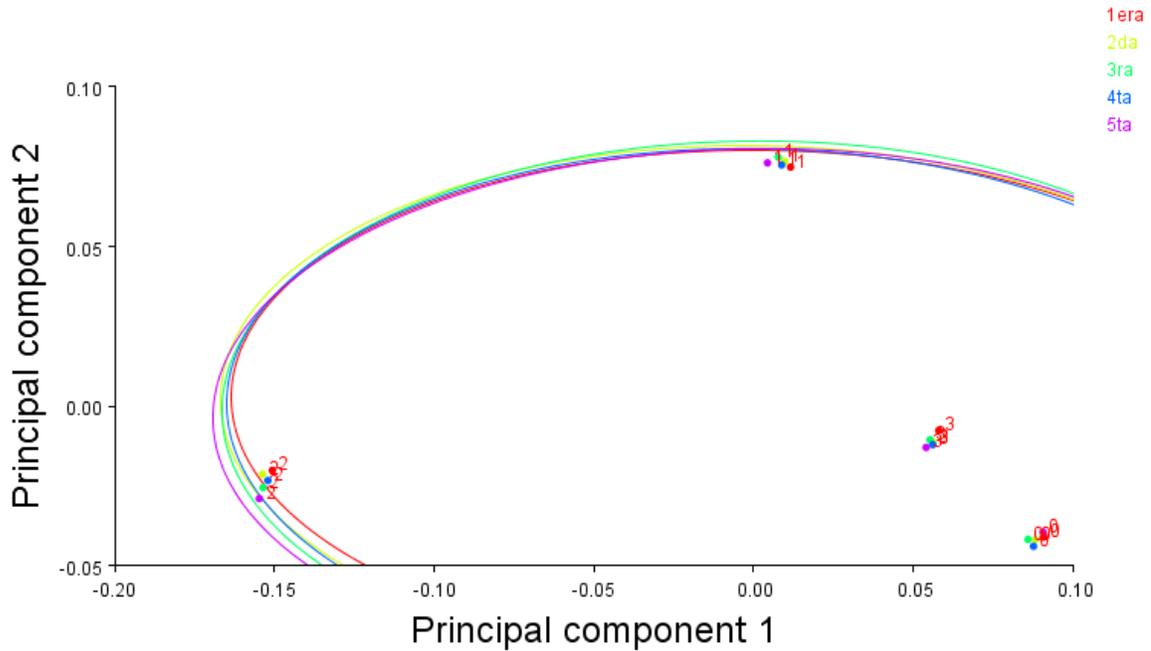


Figura 1.3. Prueba supervisada donde se observan que las repeticiones se siguen superponiendo, con elipses que explican el 70% de la variación.

Mahalanobis distances among groups:

	1era	2da	3ra	4ta	
2da		4.2096			
3ra		6.7358	4.1127		
4ta		9.3296	5.8129	4.5070	
5ta		11.3721	7.7785	5.4453	3.1308

P-values from permutation tests (10000 permutation rounds) for Mahalanobis distances among groups:

	1era	2da	3ra	4ta	
2da		0.0128			
3ra		0.0058	0.0124		
4ta		0.0263	0.0263	0.0288	
5ta		0.0242	0.0268	0.0285	0.0698

Procrustes distances among groups:

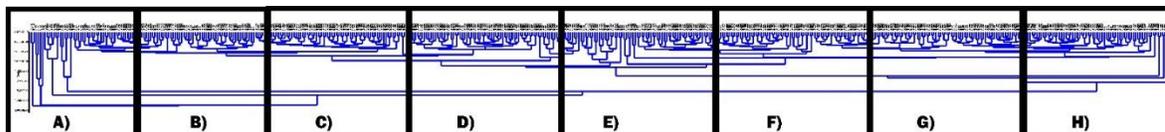
	1era	2da	3ra	4ta	
2da		0.0054			
3ra		0.0077	0.0045		
4ta		0.0082	0.0062	0.0048	
5ta		0.0100	0.0070	0.0038	0.0041

P-values from permutation tests (10000 permutation rounds) for Procrustes distances among groups:

	1era	2da	3ra	4ta	
2da		0.8256			
3ra		0.7791	0.8665		
4ta		0.7865	0.8157	0.8865	
5ta		0.7908	0.8935	0.9688	0.9637

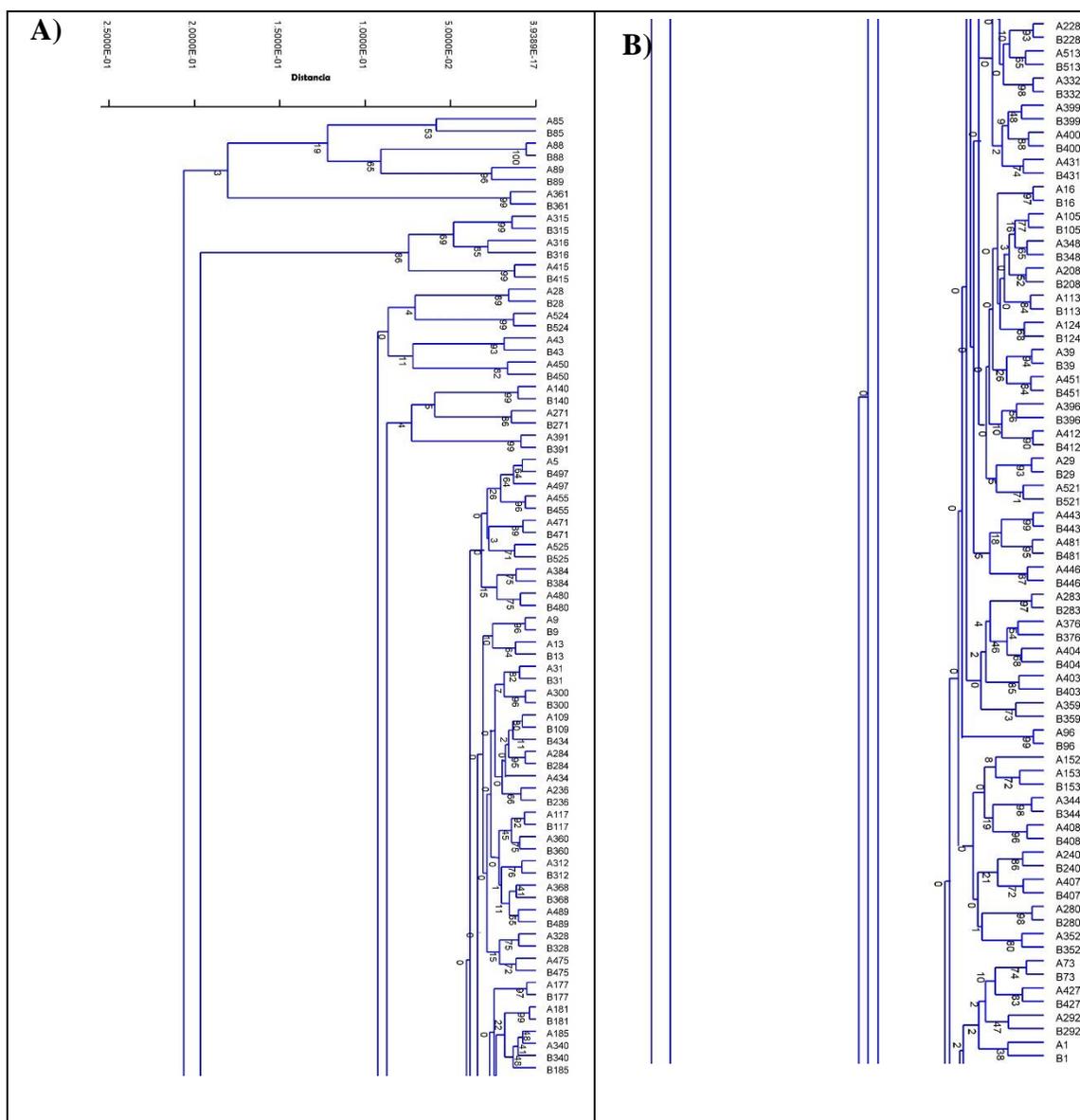
Figura 1.4. Matrices de distancias de Procrustes y de distancias de Mahalanobis con sus respectivos valores p de la prueba supervisada

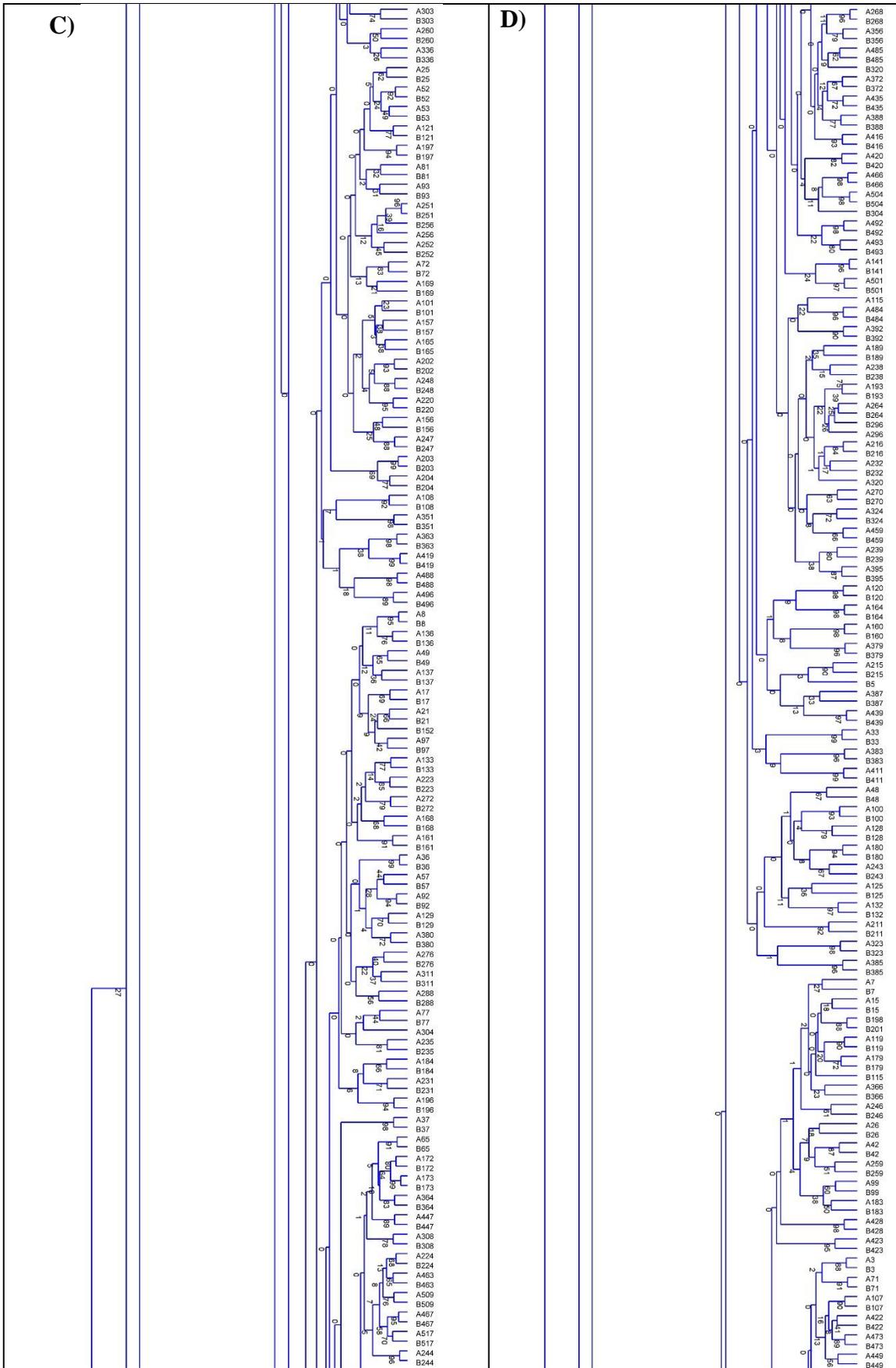
Debido al número de individuos los *clusters* tienen un tamaño mayor al que se puede colocar en una sola hoja, por ello se decidió poner ligas de internet para consultar cada uno de ellos, además que para la presentación en este trabajo se dividió de la siguiente manera:

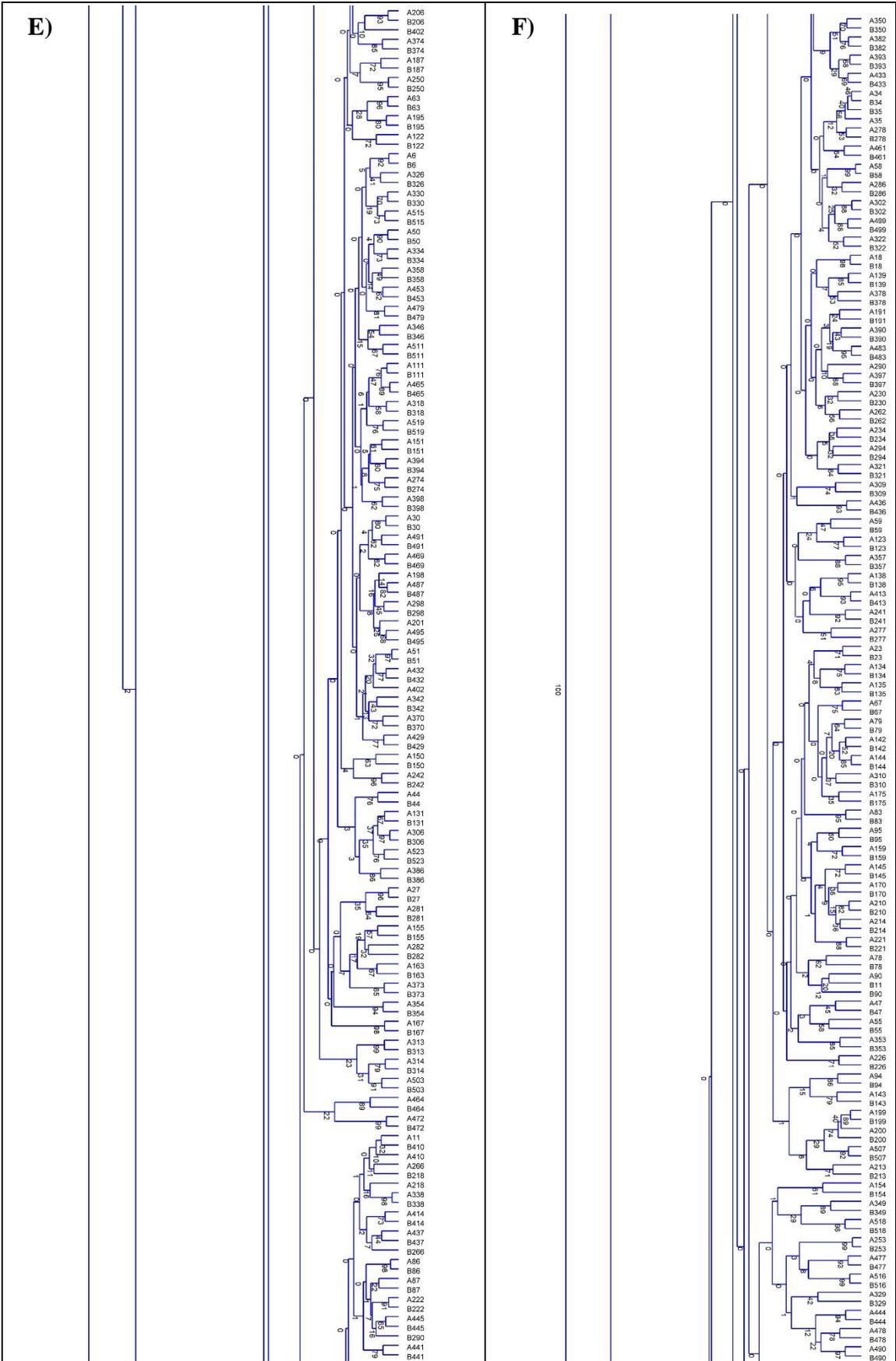


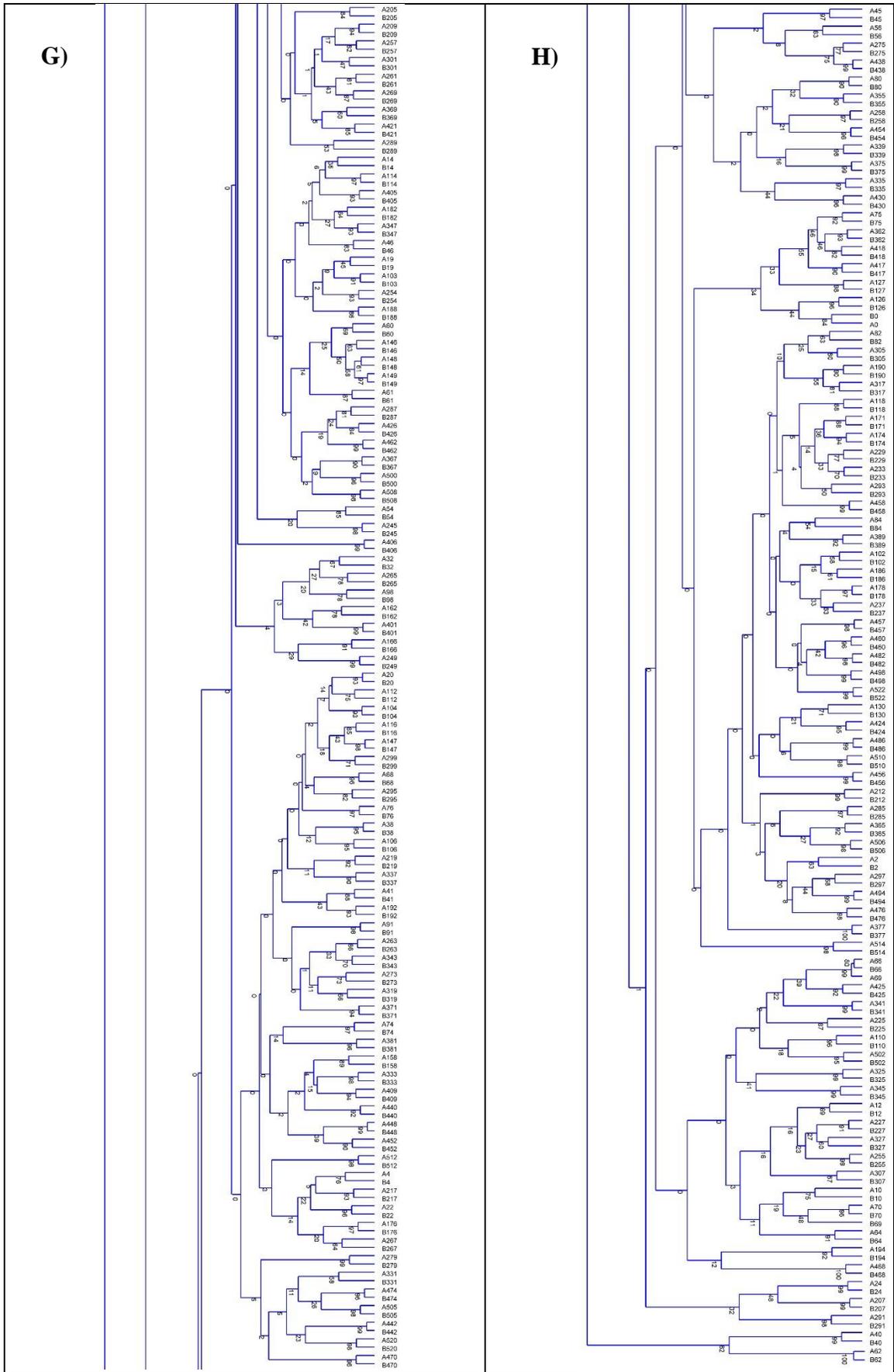
Anexo 2. Clusters de individuos en 2 dimensiones

Figura 2.1. Cluster de la totalidad de todos los individuos en 2 dimensiones









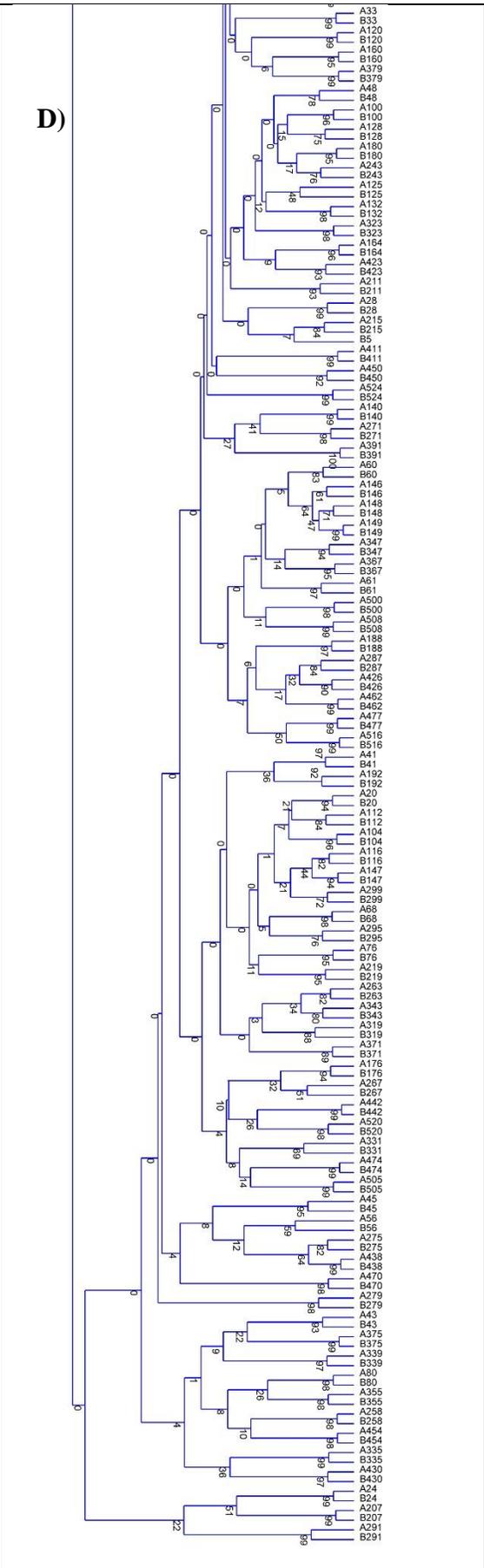
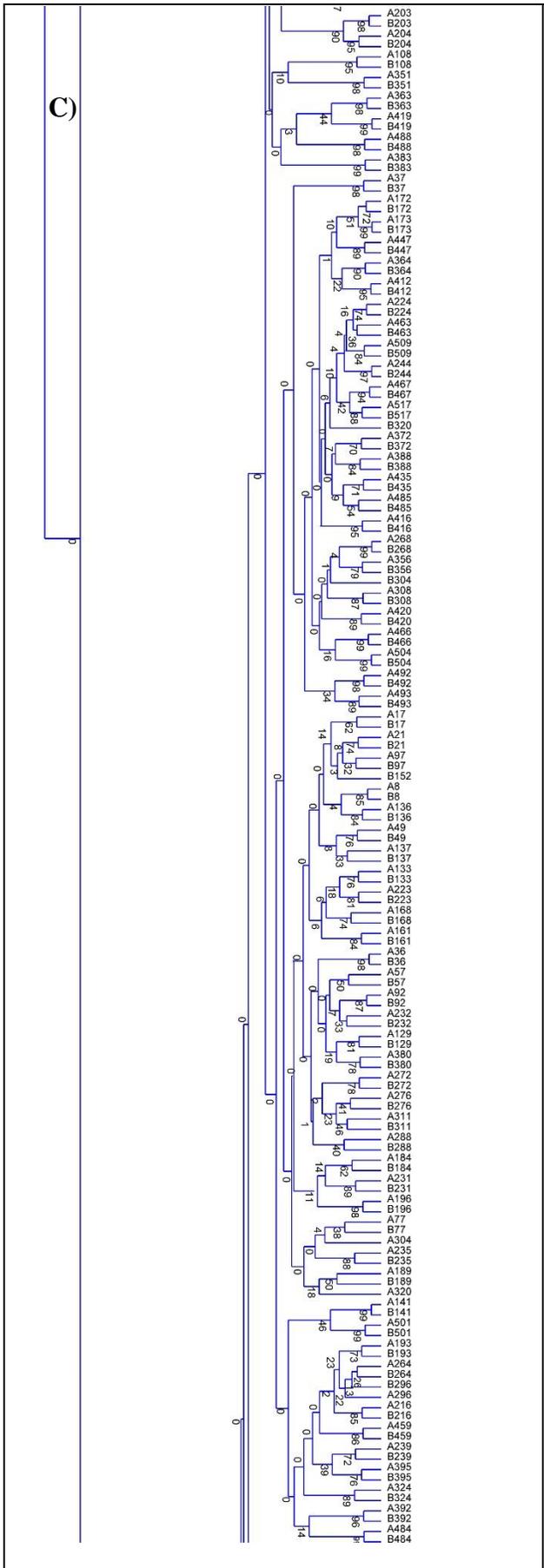
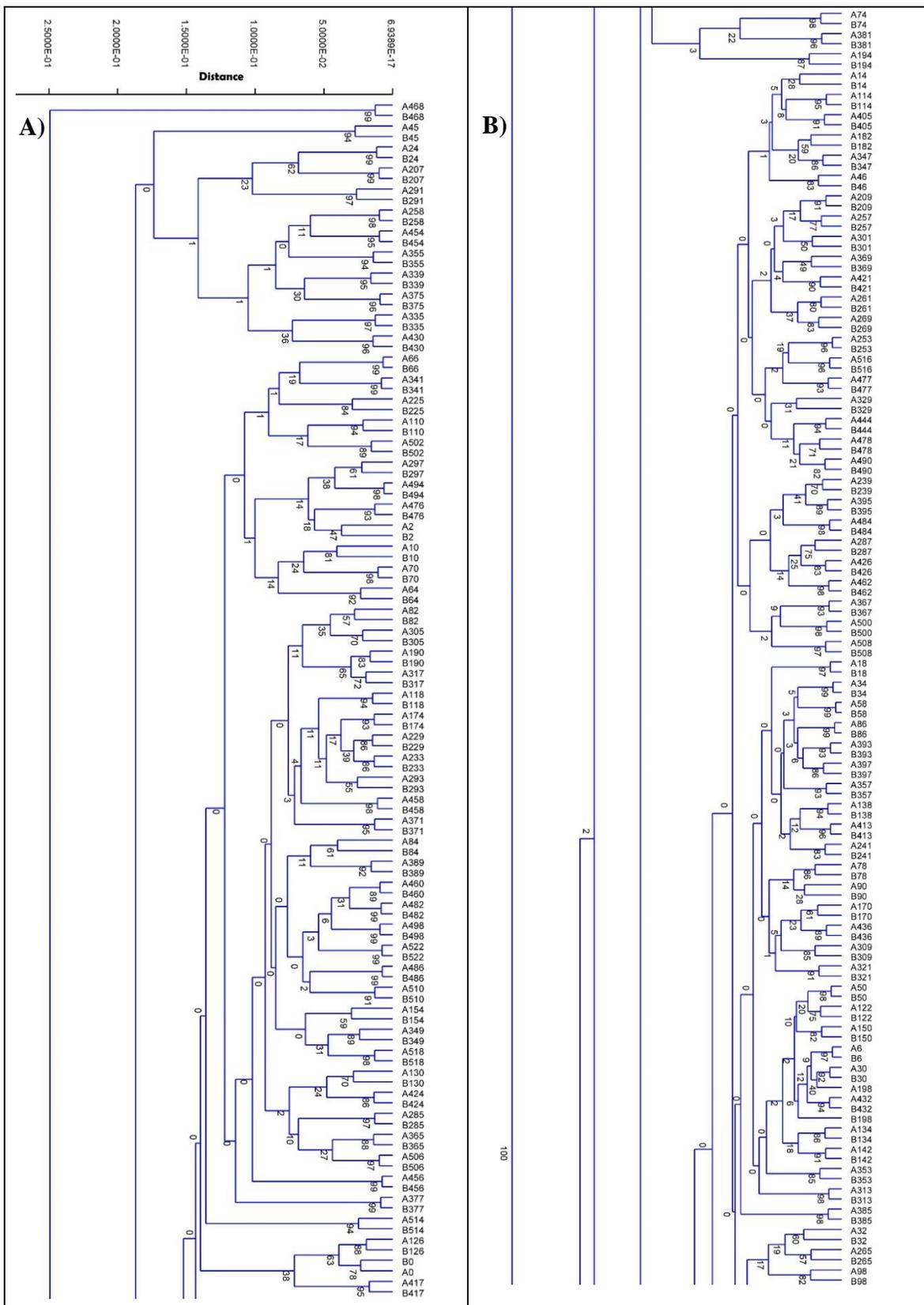


Figura 2.4 Cluster de los modelos previos al tratamiento en 2 dimensiones



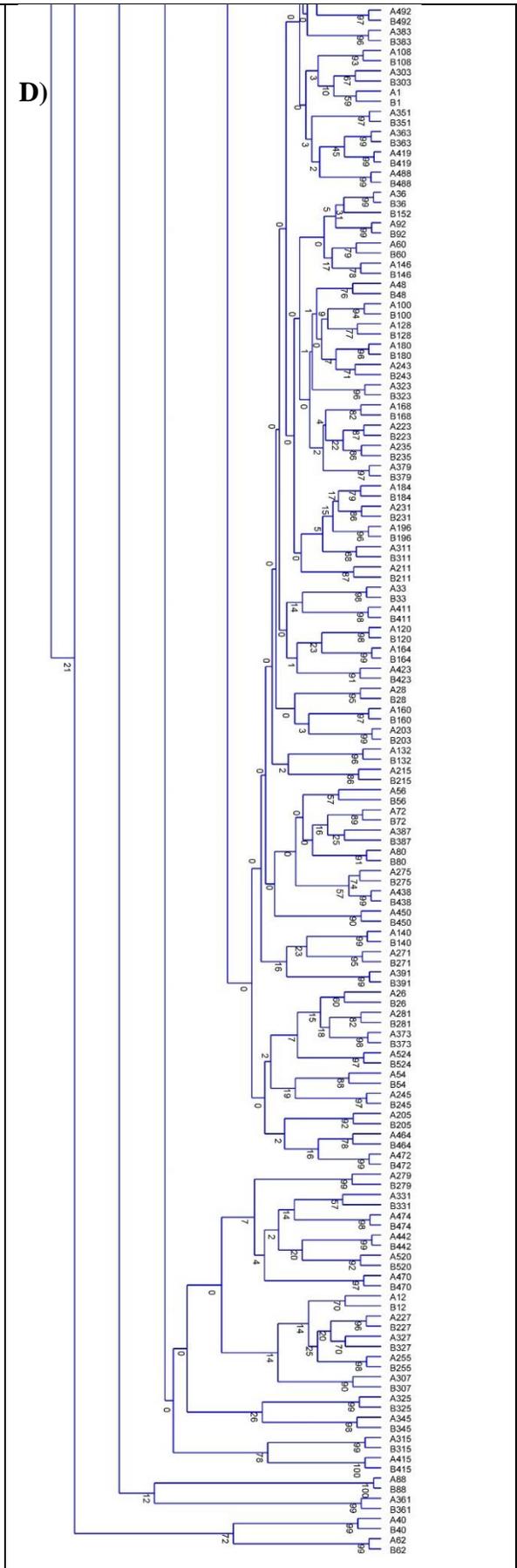
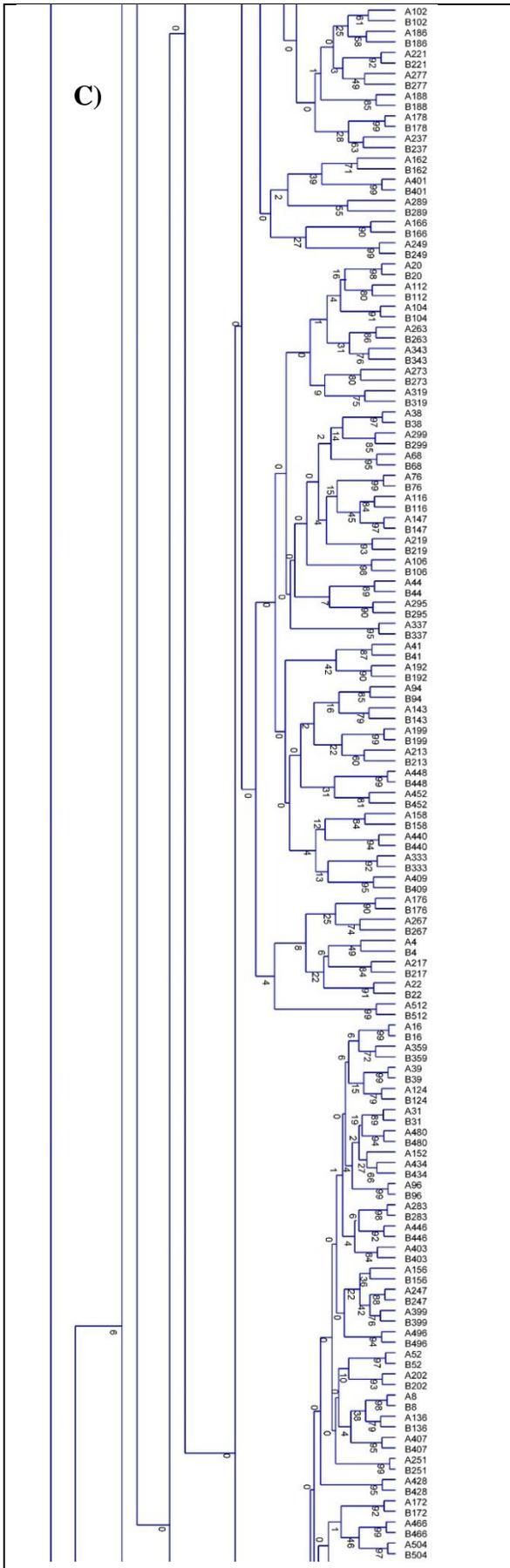
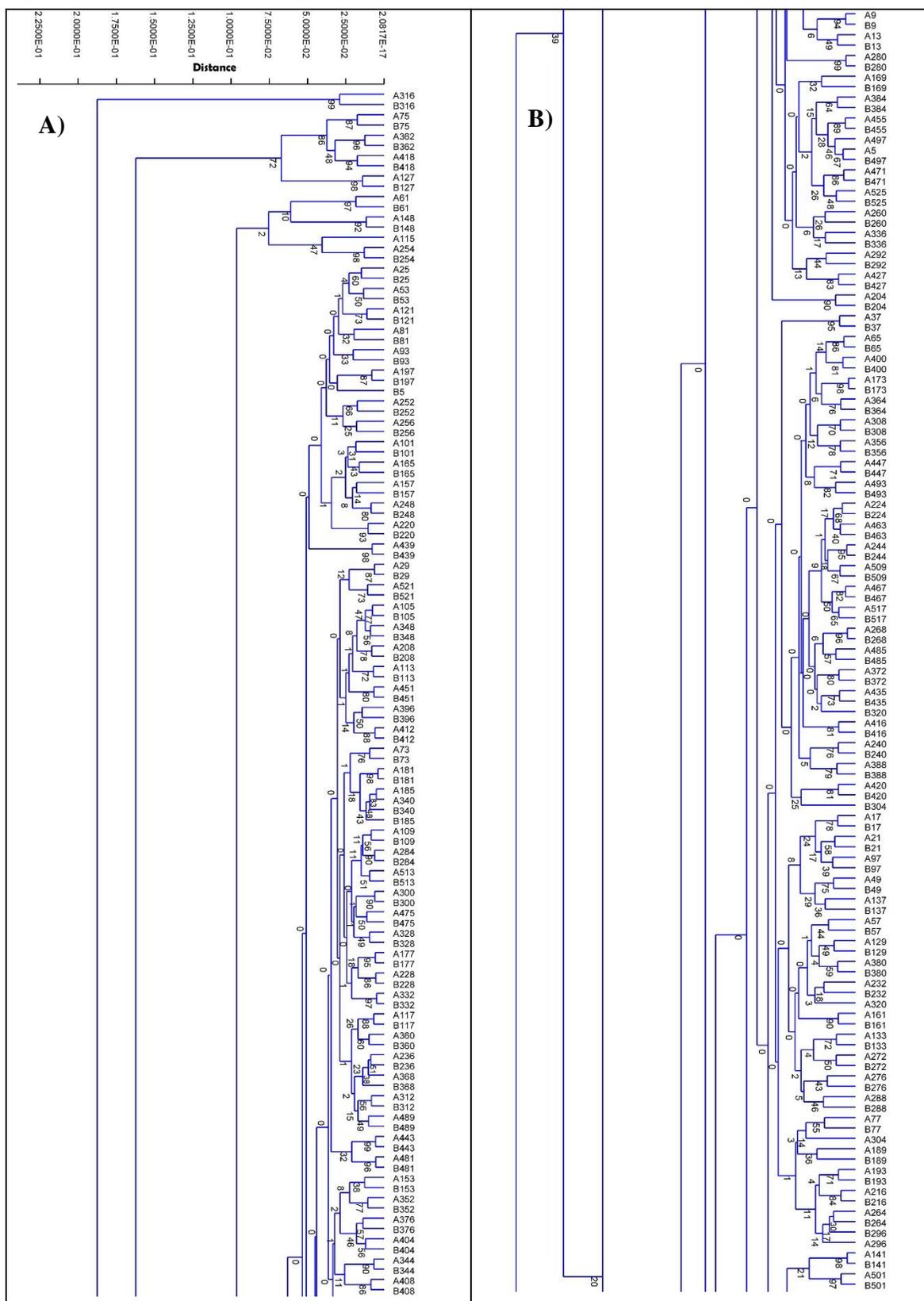
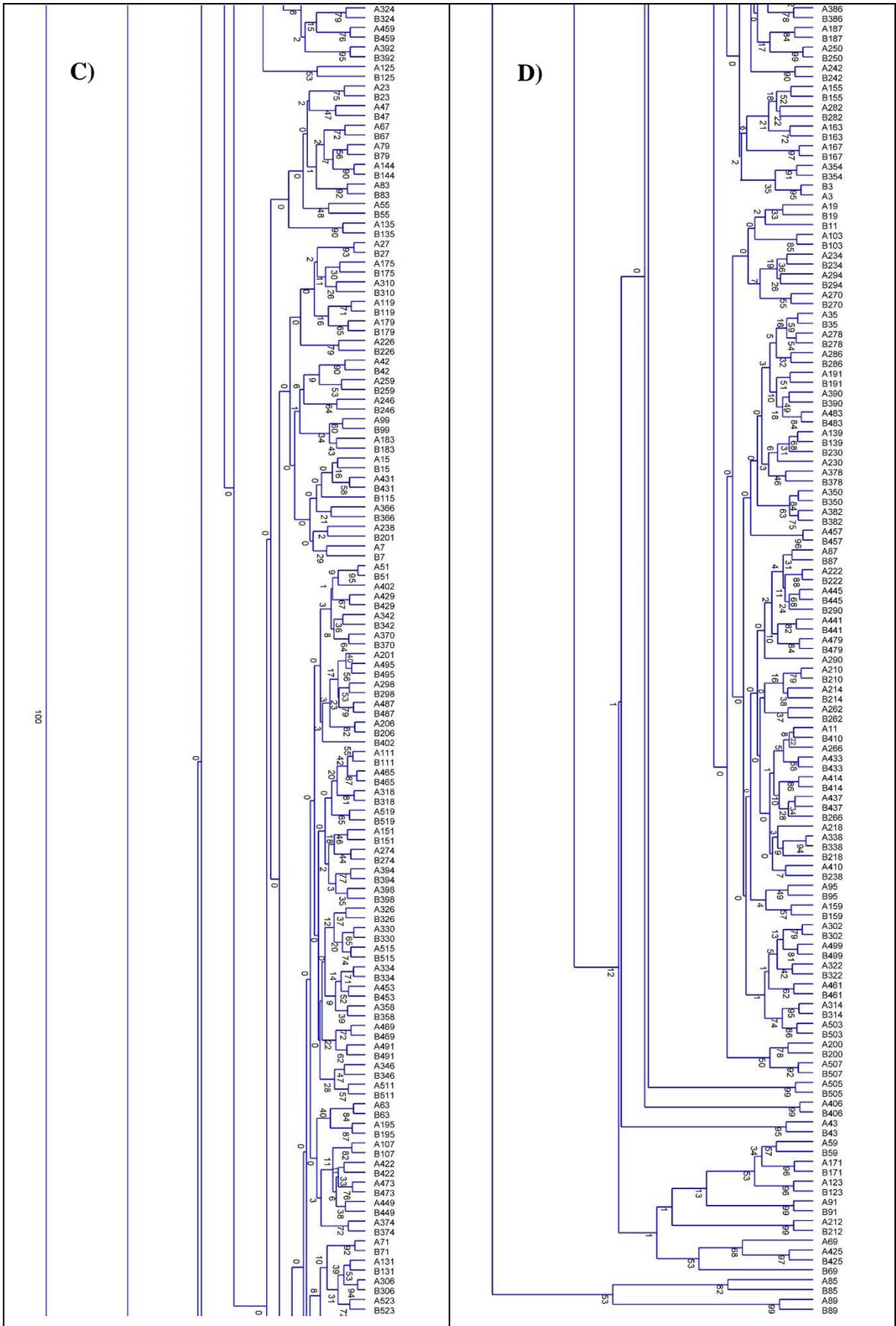


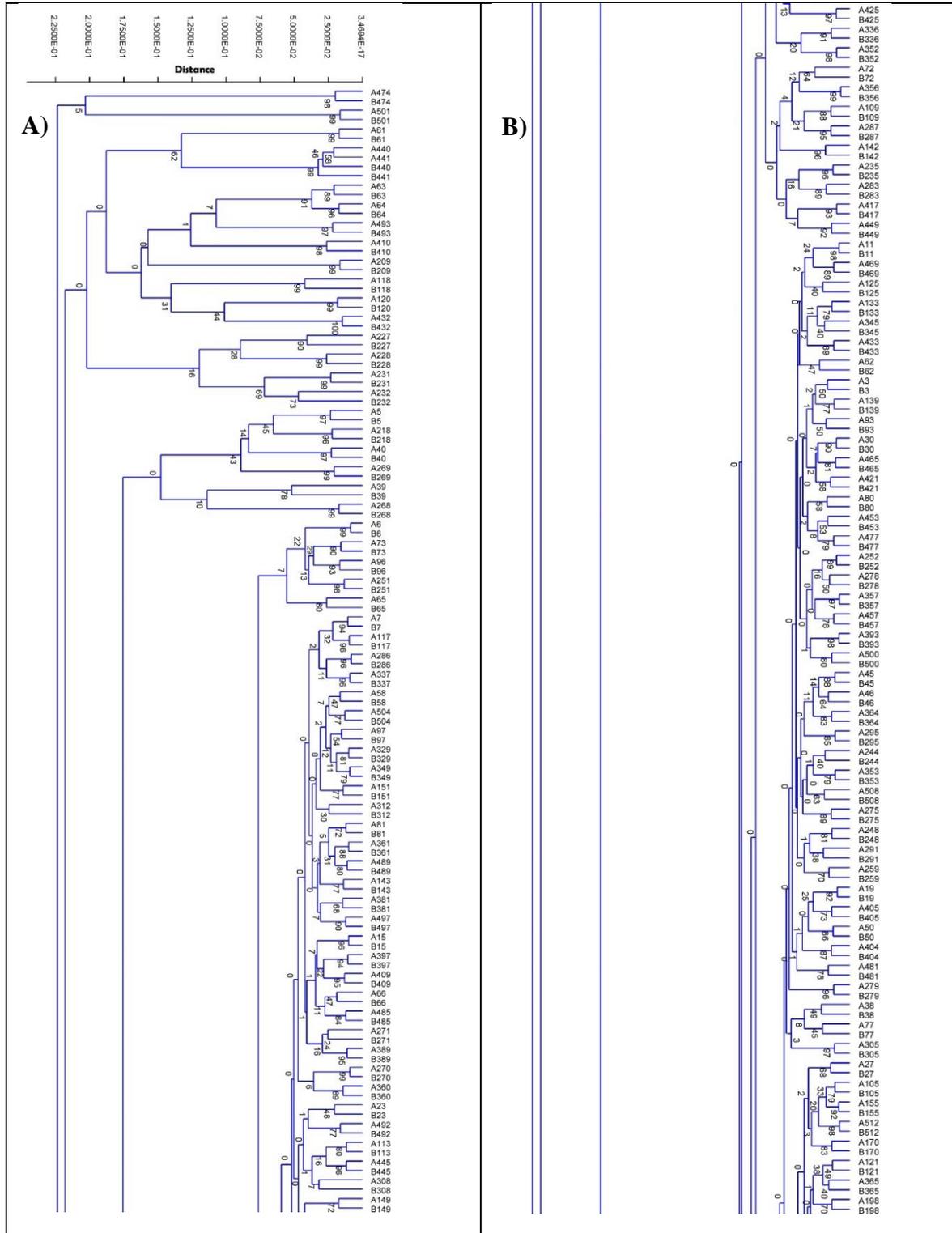
Figura 2.5 Cluster de los modelos posteriores al tratamiento en 2 dimensiones

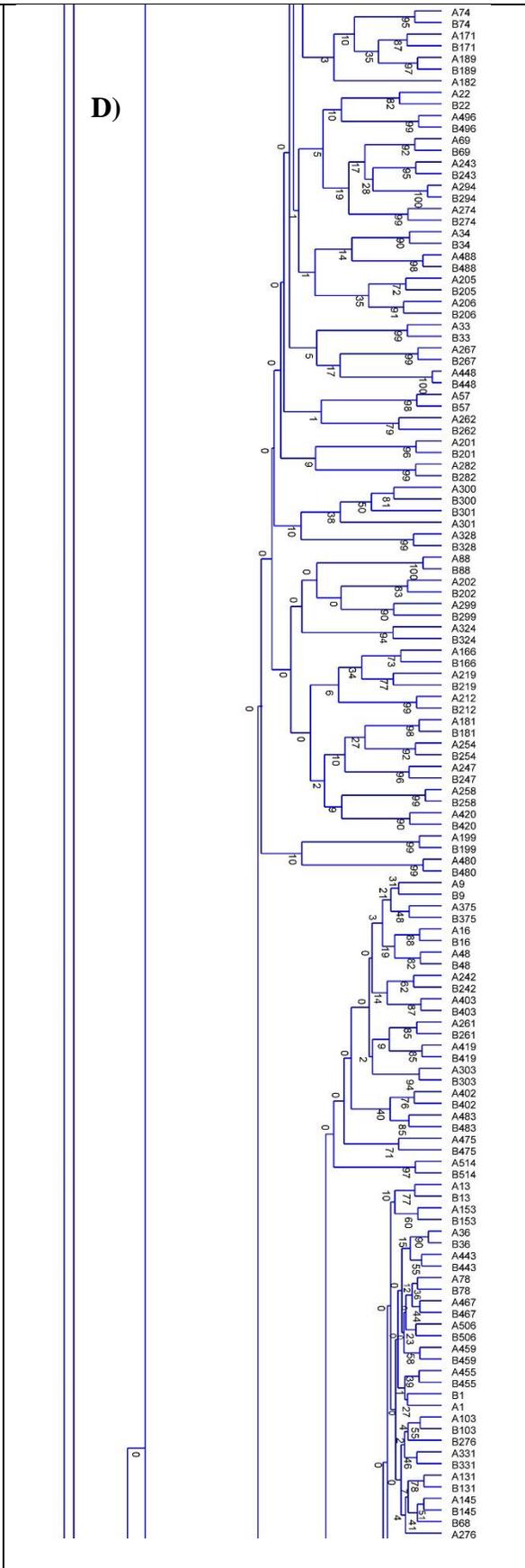
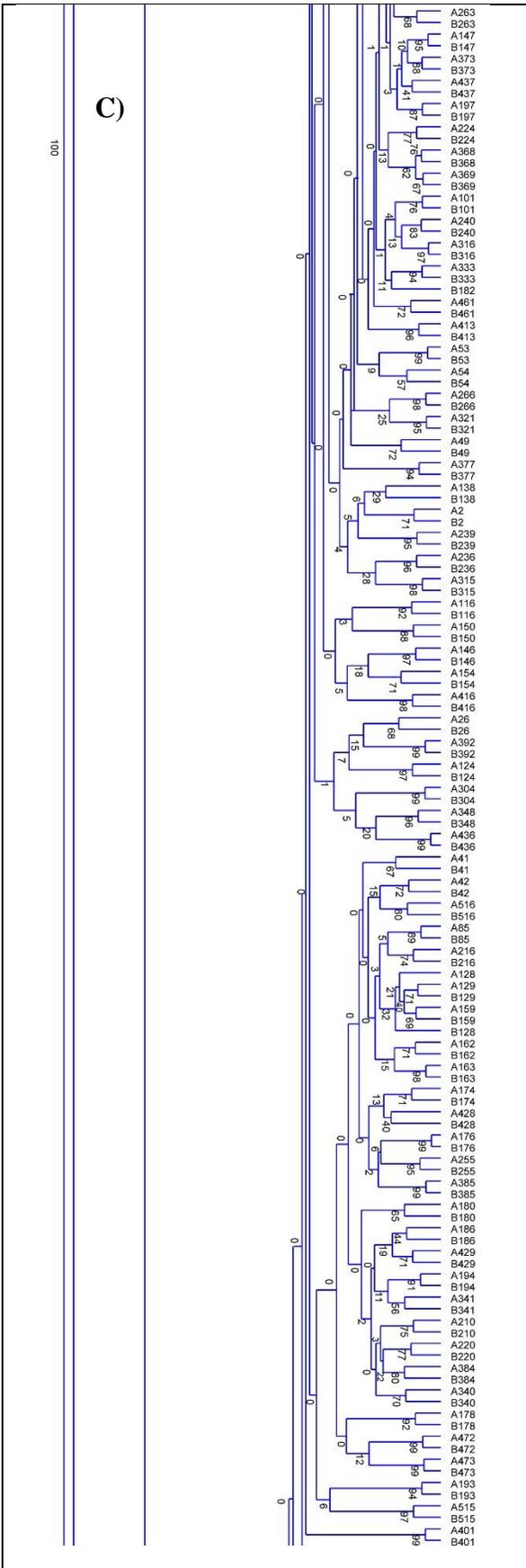


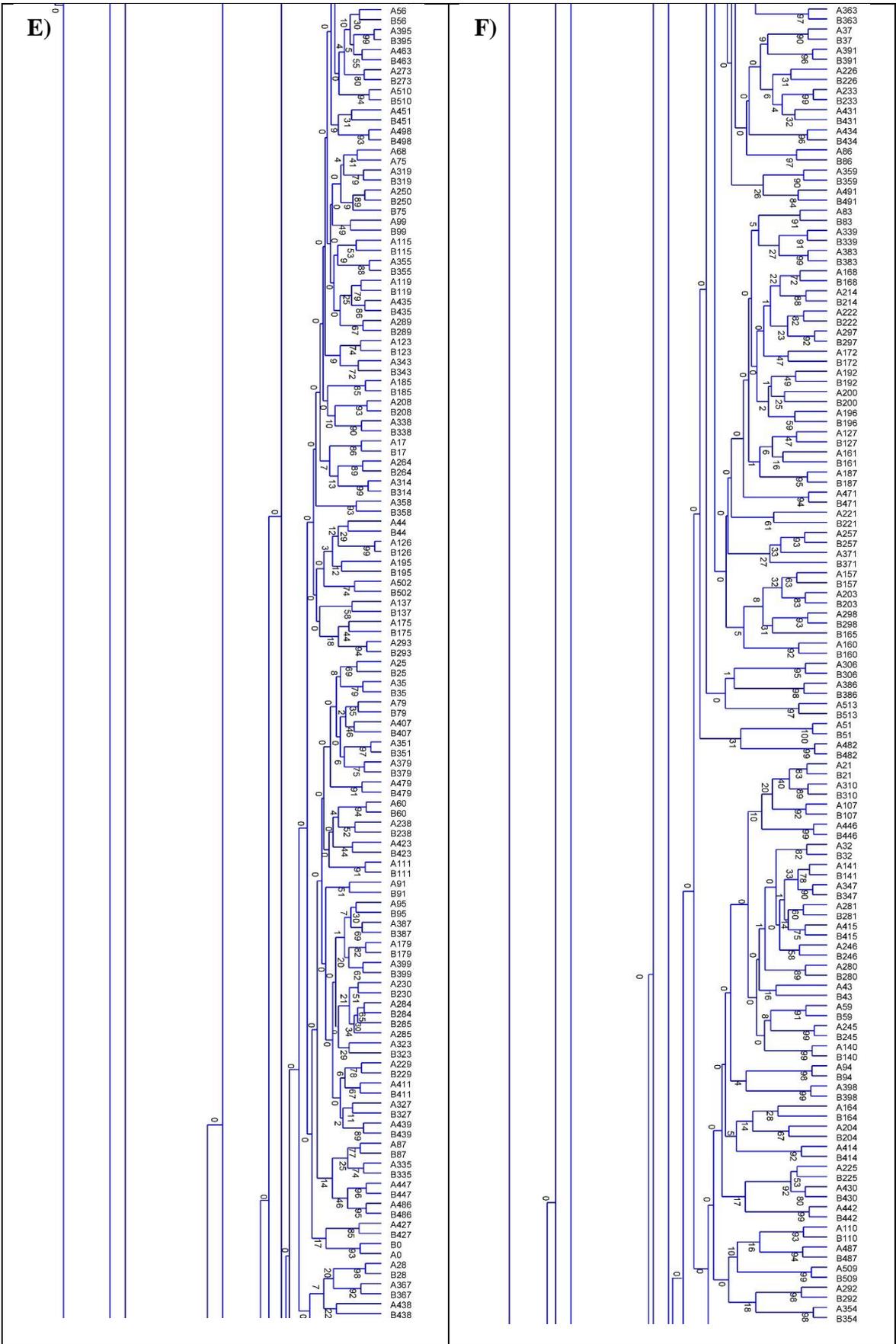


Anexo 3. Clusters de individuos en 3 dimensiones

Figura 3.1 Cluster de la totalidad de todos los individuos en 3 dimensiones







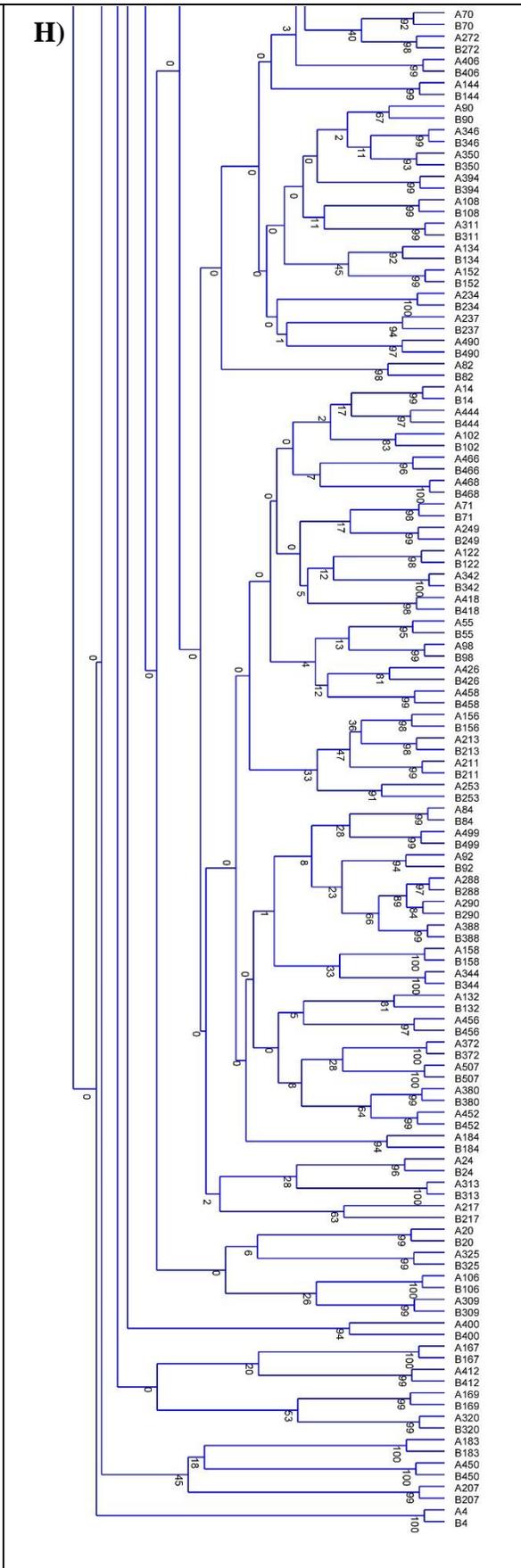
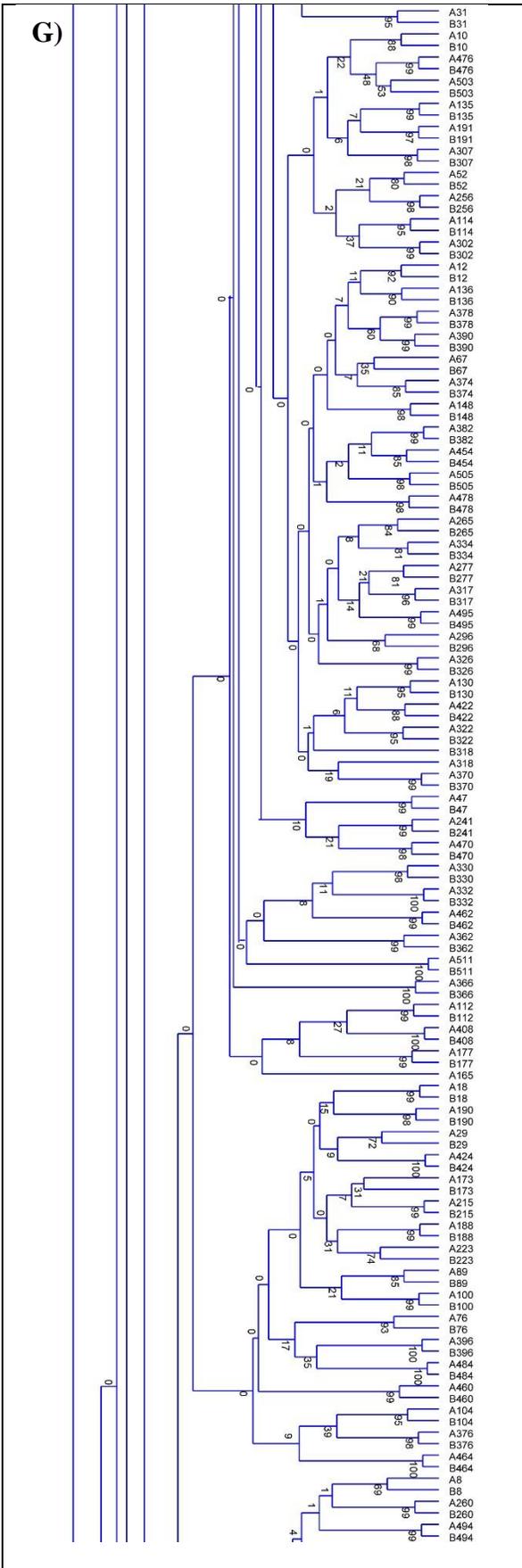
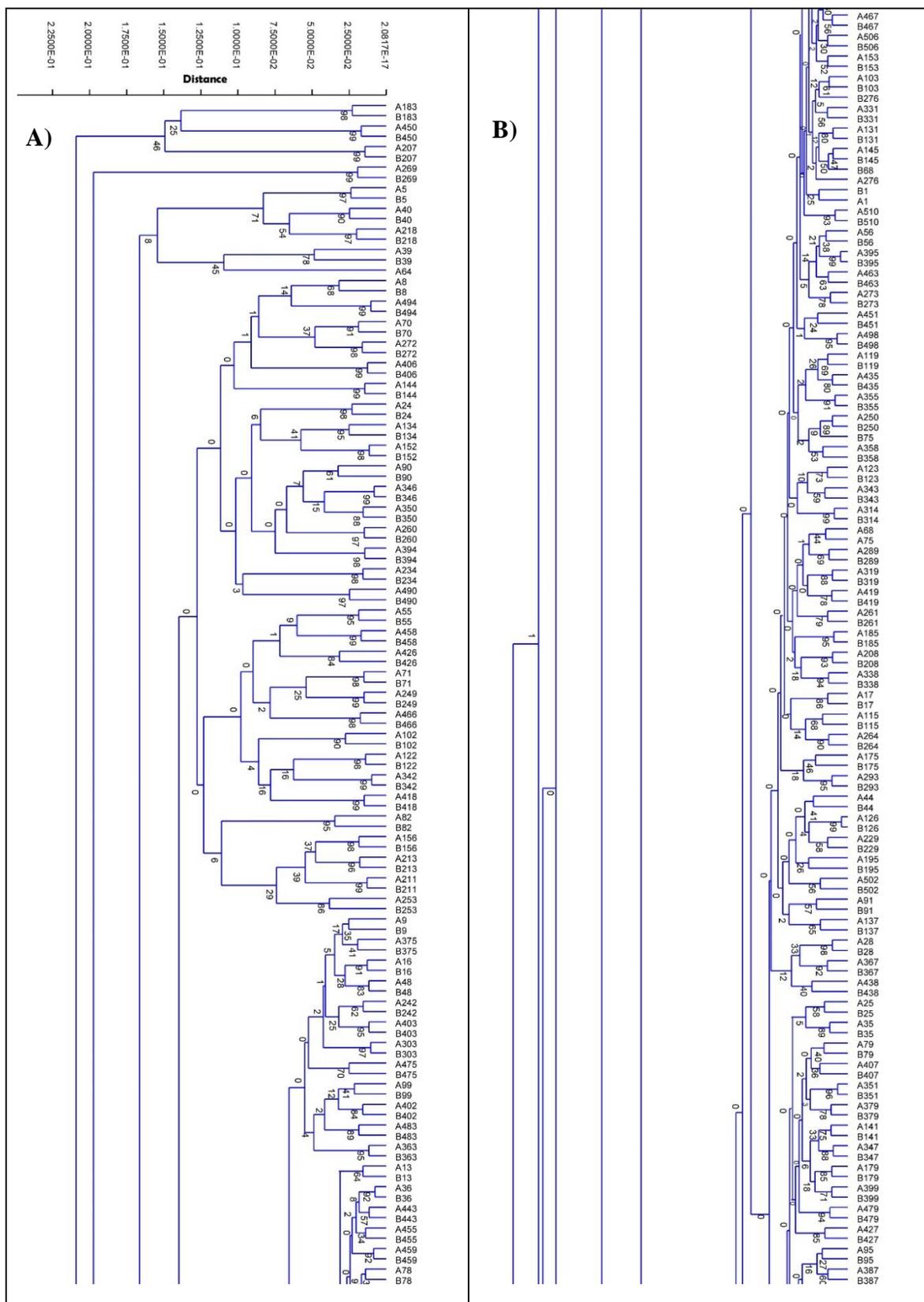


Figura 3.3 Cluster de las arcadas inferiores en 3 dimensiones



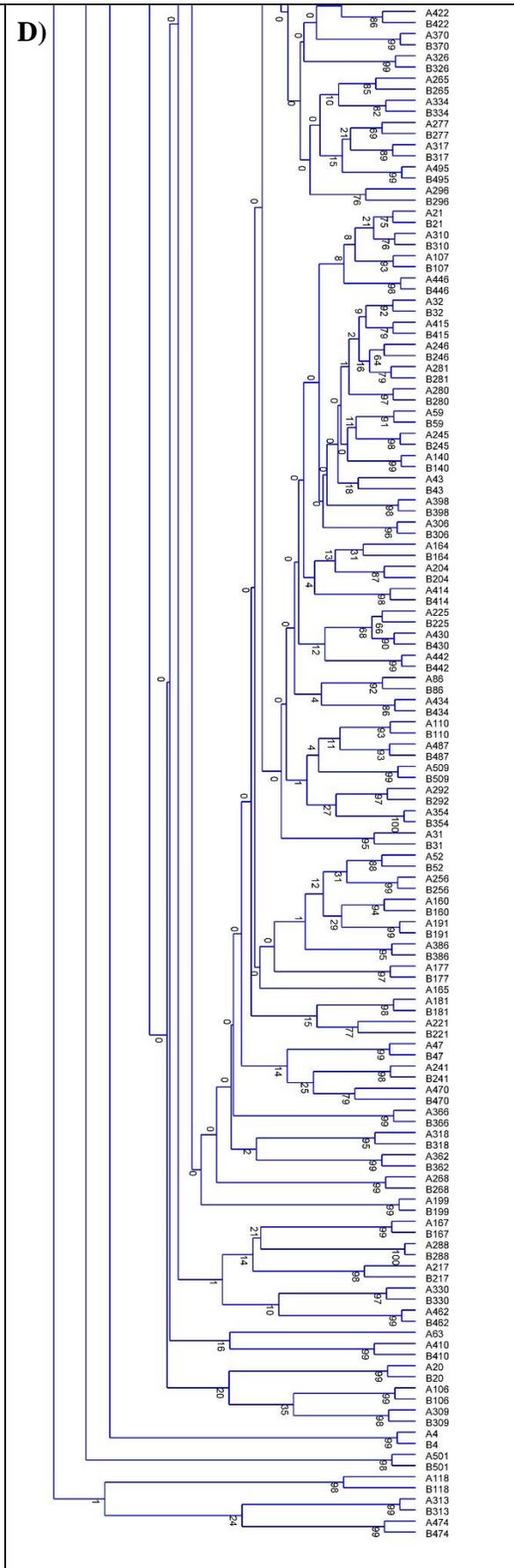
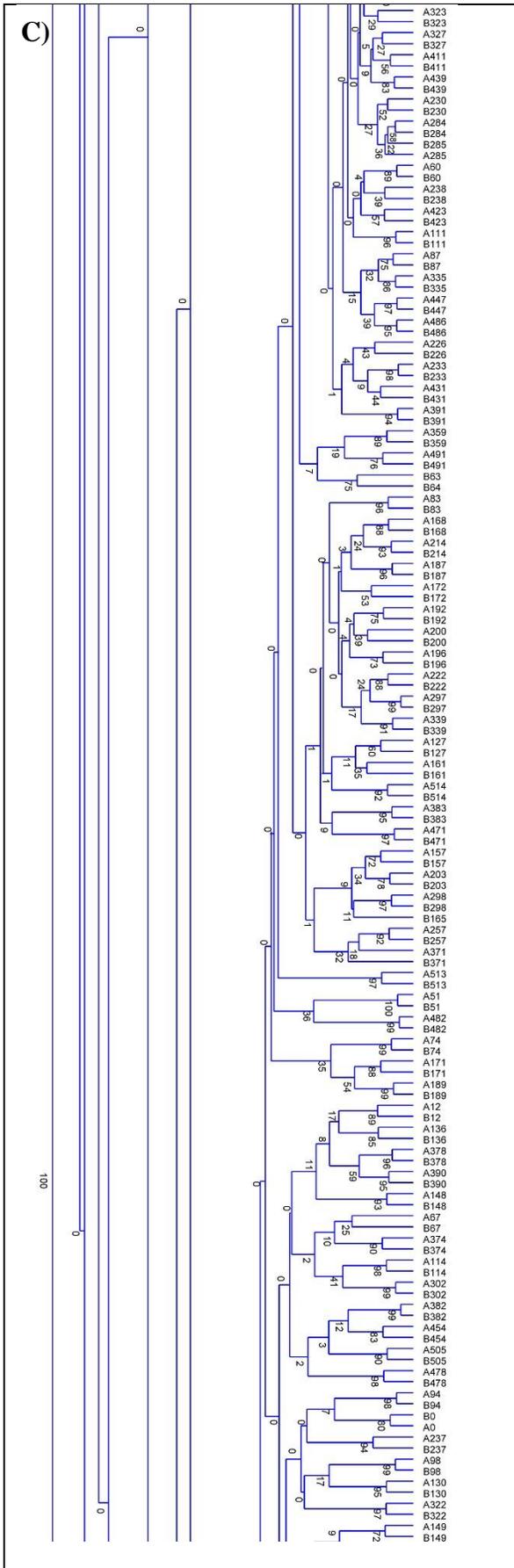
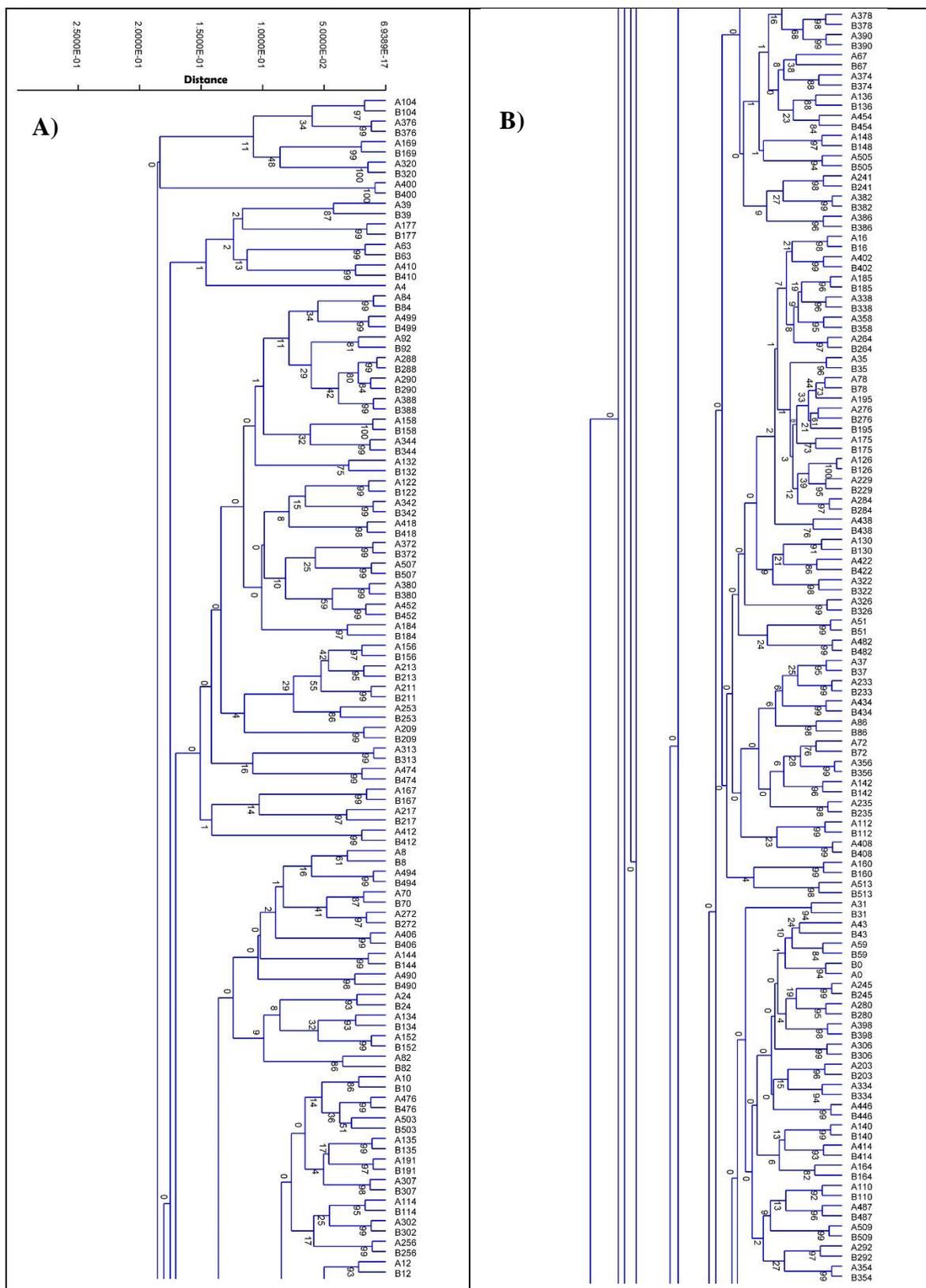


Figura 3.4 Cluster de los modelos previos al tratamiento en 3 dimensiones



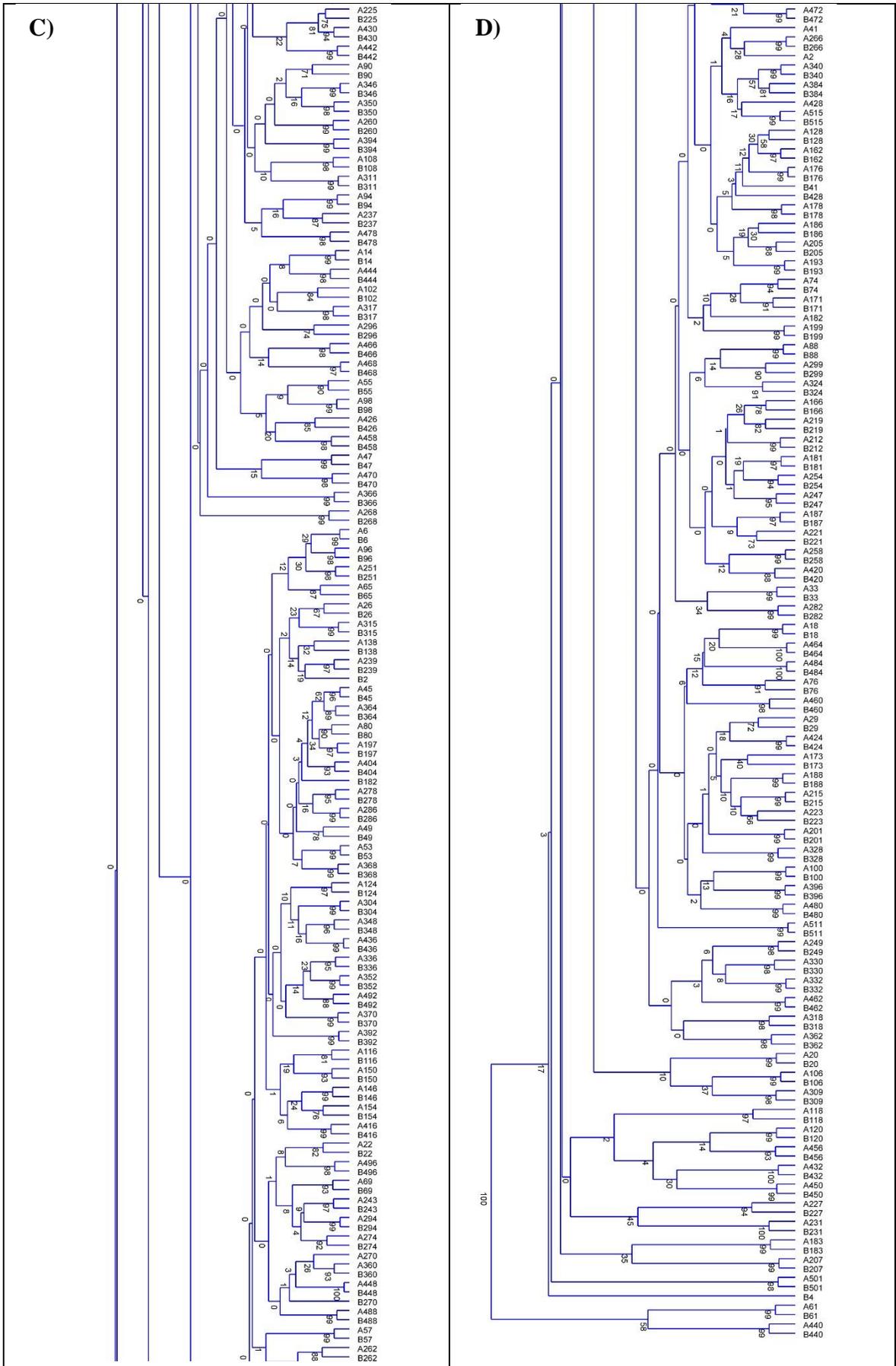


Figura 3.5 Cluster de los modelos posteriores al tratamiento en 3 dimensiones

