



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.  
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2026,  
Volumen 10, Número 3.

[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v10i3](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i3)

**VALIDACIÓN METROLÓGICA DE LA  
FOTOGRAMETRÍA EN APLICACIONES  
ODONTOLÓGICAS: UN ESTUDIO COMPARATIVO  
DE PRECISIÓN Y REPETIBILIDAD MEDIANTE UN  
ANÁLISIS FACTORIAL 23 Y REGRESIÓN  
LOGÍSTICA**

**METROLOGICAL VALIDATION OF DENTAL  
PHOTOGRAMMETRY: PRECISION AND REPEATABILITY  
ANALYSIS USING A 23 FACTORIAL DESIGN AND LOGISTIC  
REGRESSION**

**Ing. Joel Rodrigo Cruz Condori**

Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), Facultad de Ingeniería

## Validación metrológica de la fotogrametría en aplicaciones odontológicas: un estudio comparativo de precisión y repetibilidad mediante un análisis factorial $2^3$ y regresión logística

Ing. Joel Rodrigo Cruz Condori<sup>1</sup>

[jrcruz8@umsa.bo](mailto:jrcruz8@umsa.bo)

<https://orcid.org/0009-0006-9891-7141>

Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), Facultad de Ingeniería  
Bolivia

### RESUMEN

La odontología digital requiere flujos de trabajo de alta precisión, pero los sensores profesionales siguen siendo costosos. Este estudio valida metrológicamente un protocolo de fotogrametría de bajo costo mediante un diseño factorial completo  $2^3$ . Se utilizó un estándar de referencia, fabricado con tecnología de estereolitografía enmascarada (MSLA) y caracterizado con instrumentos de medición, para evaluar la precisión. Los resultados indican que, si bien ciertas dimensiones como b1 alcanzan un error absoluto de 0,01 mm, otras, como b2, presentan errores de hasta 0,48 mm, superando el umbral clínico de 120  $\mu\text{m}$ . La regresión logística identificó las condiciones de iluminación como el factor más crítico para una reconstrucción 3D exitosa. A pesar de las imprecisiones locales en geometrías complejas, el estudio Gage R&R arrojó una variación del 6,4 %, lo que confirma la estabilidad del protocolo. Esta investigación define los límites operativos de la fotogrametría de bajo costo para aplicaciones dentales.

**Palabras clave:** Diseño factorial; fotogrametría digital; metrología dental; validación metrológica; tecnología MSLA.

---

<sup>1</sup> Autor principal

Correspondencia: [jrcruz8@umsa.bo](mailto:jrcruz8@umsa.bo)

# Metrological validation of dental photogrammetry: precision and repeatability analysis using a 2<sup>3</sup> factorial design and logistic regression

## ABSTRACT

Digital dentistry requires high-precision workflows, but professional sensors remain expensive. This study metrologically validates a low-cost photogrammetry protocol using a 2<sup>3</sup> full factorial design. A reference standard, fabricated with masked stereolithography (MSLA) technology and characterized with measuring instruments, was used to assess accuracy. The results indicate that while certain dimensions such as b1 achieve an absolute error of 0.01 mm, others, such as b2, exhibit errors of up to 0.48 mm, exceeding the clinical threshold of 120 μm. Logistic regression identified lighting conditions as the most critical factor for successful 3D reconstruction. Despite local inaccuracies in complex geometries, the Gage R&R study yielded a variation of 6.4%, confirming the stability of the protocol. This research defines the operational limits of low-cost photogrammetry for dental applications.

**Keywords:** Factorial design; digital photogrammetry; dental metrology; metrological validation; MSLA technology.

*Artículo recibido 20 marzo 2026  
Aceptado para publicación: 15 abril 2026*



## INTRODUCCIÓN

La odontología moderna ha experimentado una transformación significativa hacia el flujo de trabajo digital, donde la precisión dimensional es el factor crítico para el éxito clínico de las prótesis y modelos de estudio. La tecnología de Estereolitografía Enmascarada (MSLA) ha surgido como una solución accesible para la fabricación de estas piezas, destacando por su capacidad de reproducir geometrías complejas con resoluciones de micras. Sin embargo, la contracción térmica y la fotopolimerización intrínseca de las resinas pueden generar variaciones respecto al diseño CAD original.

A pesar de la disponibilidad de escáneres industriales de alta gama, existe una necesidad creciente de validar métodos de inspección metrológica más económicos. La fotogrametría digital se presenta como una alternativa viable, permitiendo la reconstrucción tridimensional de piezas mediante algoritmos de procesamiento de imagen. La presente investigación tiene como objetivo validar metrológicamente el protocolo de fotogrametría bajo diferentes condiciones operativas.

Este estudio radica en el uso de la tecnología para la odontología digital en regiones en vías de desarrollo, como Bolivia, donde el acceso a escáneres intraorales o industriales de alta precisión suele estar limitado por sus elevados costos operativos y de adquisición. En este contexto, la fotogrametría digital surge no solo como una herramienta de bajo costo, sino como un sistema flexible capaz de adaptarse a las necesidades de laboratorios dentales locales.

En el ámbito de la manufactura aditiva, se establece que la tecnología MSLA, si bien ofrece una resolución superficial superior en comparación con el Modelado por Deposición Fundida (FDM), presenta desafíos críticos en la estabilidad dimensional. Estos desafíos derivan de variables como el tiempo de exposición, la intensidad de la radiación UV y los procesos de post-curado intrínsecos a las resinas empleadas en la fabricación. Investigaciones previas han demostrado que dichas variables pueden inducir errores sistemáticos que comprometen el ajuste marginal de las piezas protésicas. En consecuencia, el presente estudio se enfoca en determinar si un protocolo de fotogrametría basado en equipos convencionales puede alcanzar niveles de precisión aceptables para la práctica clínica. Para ello, se propone un enfoque experimental que aísla las variables críticas del proceso de captura de imagen, con el fin de establecer un flujo de trabajo optimizado que minimice la incertidumbre en la medición



dimensional de los modelos dentales. A continuación, se detalla la metodología experimental empleada, estructurada bajo un diseño factorial para la evaluación rigurosa de las variables mencionadas.

## **DISEÑO EXPERIMENTAL**

La investigación se basó en un enfoque cuantitativo de nivel experimental. Se implementó un diseño factorial completo  $2^3$  con dos réplicas, lo que resultó en un total de 16 corridas experimentales. Este diseño permitió evaluar la influencia de tres factores controlables sobre la precisión dimensional de la medición en las cinco cotas de estudio (b1, b2, b3, c1 y c2). Los factores y niveles definidos se detallan a continuación:

- Factor A: Tipo de Cámara. Nivel bajo: Cámara de 13 MP, f/1.9 (Tecno Pova 1). Nivel alto: Cámara de 50 MP, f/1.9 (Tecno Camon 40 PRO).
- Factor B: Iluminación. Nivel bajo: Aros LED. Nivel alto: Foco LED de alta intensidad.
- Factor C: Número de fotografías. Nivel bajo: 60 fotografías. Nivel alto: 120 fotografías.

Los factores A, B y C serán evaluados para encontrar el protocolo de captura que maximice la precisión metrológica que sea clínicamente aceptable (menor a  $120\ \mu\text{m}$ )

## **EQUIPOS Y MATERIALES**

- Fabricación Aditiva: Se utilizó una impresora 3D de tecnología MSLA (Masked Stereolithography) modelo Elegoo Mars 5, caracterizada por una resolución en el eje XY de  $35 \times 35\ \mu\text{m}$ . Se empleó resina fotopolimerizable estándar de la marca Elegoo, procesada bajo parámetros de exposición optimizados según las especificaciones del fabricante.
- Sistema de Captura: La adquisición de datos se realizó mediante los sensores principales de los dispositivos Tecno Pova 1 y Tecno Camon 40 PRO. Para garantizar una cobertura de 360 grados y solapamiento de imágenes, las piezas se posicionaron sobre una base giratoria motorizada.
- Software: La reconstrucción tridimensional (nube de puntos y malla) a partir de las imágenes se llevó a cabo en el software de código abierto Meshroom. El análisis estadístico de los datos, incluyendo el procesamiento del diseño de experimentos, se ejecutó en Minitab 22.1.

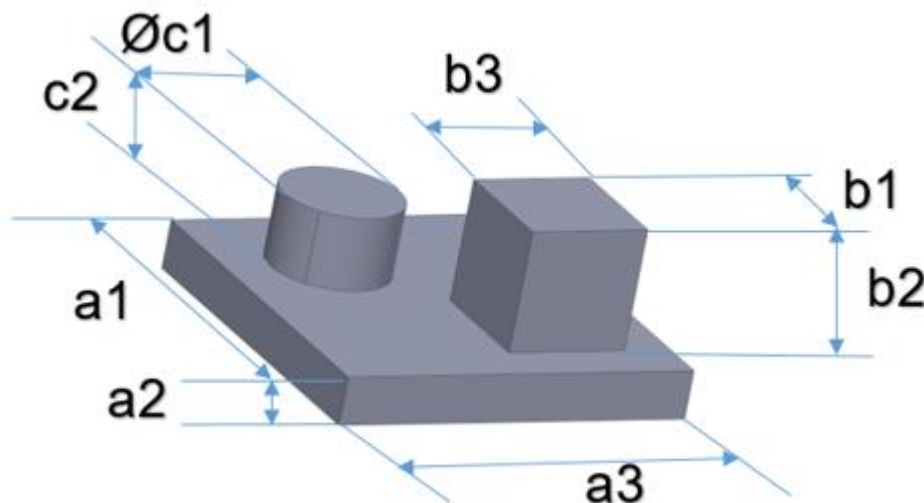


## PROCEDIMIENTO

1. Diseño CAD: Se desarrolló un modelo digital geométrico que combina formas cuadradas y cilíndricas, estableciendo dimensiones nominales de 10 mm para las principales cotas de control, de acuerdo con los detalles presentados en la Figura 1 y la Tabla 1.
2. Impresión y Post-procesado: Las muestras fueron fabricadas en la impresora Mars 5, lavadas en alcohol isopropílico para eliminar excedentes de resina y sometidas a un ciclo de post-curado UV para asegurar la estabilidad mecánica y dimensional final.
3. Captura de Datos: Se ejecutaron las combinaciones del diseño factorial variando sistemáticamente la iluminación, el dispositivo de captura y la densidad de fotografías por toma.
4. Procesamiento Fotogramétrico: El conjunto de fotografías se procesó en Meshroom para generar modelos digitales en formato *stl*.
5. Medición Metrológica: Se compararon las dimensiones de los modelos reconstruidos mediante el protocolo de fotogrametría contra el diseño CAD original, registrando las desviaciones en milímetros para su posterior análisis.

**Figura 1:**

Diseño geométrico del patrón de calibración y definición de cotas (a, b, c)



*Nota:* Para el diseño CAD se empleó el programa SolidWorks 2021

*Fuente:* Elaboración propia.

**Tabla 1.**

Valor de las cotas utilizada en el diseño CAD para el patrón de calibración

Cota	a1 [mm]	a2 [mm]	a3 [mm]	b1 [mm]	b2 [mm]	b3 [mm]	Øc1 [mm]	c2 [mm]
Valor	30	4	30	10	10	10	10	6

*Nota:* Se utiliza el milímetro [mm] como unidad de medida, de acuerdo con los múltiplos y submúltiplos del Sistema

Internacional de Unidades (SI).

*Fuente:* Elaboración propia.

## RESULTADOS

En esta sección se presentan los datos recabados y el análisis estadístico obtenido mediante el software Minitab 22.1.

### CARACTERIZACIÓN METROLÓGICA DEL PATRÓN DE CALIBRACIÓN

#### (REFERENCIA)

Antes de evaluar el proceso de fotogrametría, se realizaron mediciones directas sobre la pieza física impresa en tecnología MSLA para establecer los valores reales de referencia. La Tabla 2 muestra la comparativa entre el diseño teórico (CAD) y las dimensiones reales de la pieza fabricada.

**Tabla 2.**

Toma de medidas al patrón de calibración

n	a1 [mm]	a2 [mm]	a3 [mm]	b1 [mm]	b2 [mm]	b3 [mm]	Øc1 [mm]	c2 [mm]
1	30,20	4,07	30,20	10,03	9,93	10,12	10,06	5,93
2	30,19	4,07	30,14	9,99	9,81	10,11	10,01	5,97
3	30,19	4,04	30,16	10,02	9,97	10,12	10,05	5,92
4	30,20	4,02	30,16	10,02	9,86	10,12	10,04	5,90
5	30,20	4,05	30,16	10,02	9,93	10,13	10,01	6,00

*Nota:* Se tomó las medidas con el Vernier digital TOTAL modelo TMT321501

*Fuente:* Elaboración propia

En base a los datos de la Tabla 1 mediante un análisis ANOVA con nivel de confianza del 95% se tiene los valores promedios y los errores de cada medición. (ver Tabla 3).



**Tabla 3.**

Cálculo de los errores absolutos de las cotas del patrón de calibración

Cota	$\bar{X}$	+/- E
a1 [mm]	30,20	+/- 0,01
a2 [mm]	4,05	+/- 0,01
a3 [mm]	30,16	+/- 0,01
b1 [mm]	10,02	+/- 0,01
b2 [mm]	9,90	+/- 0,01
b3 [mm]	10,12	+/- 0,01
Øc1 [mm]	10,03	+/- 0,01
c2 [mm]	5,94	+/- 0,01

*Nota:* Al ser medidos todos con el mismo instrumento y que todos tengan el mismo número de muestras, nos da un único valor para el error absoluto.

*Fuente:* Elaboración propia.

## RESULTADO DEL PROTOCOLO DE FOTOGRAMETRÍA

Una vez caracterizado el patrón, se procedió a la reconstrucción digital mediante fotogrametría bajo las 16 condiciones del diseño experimental. La Tabla 4 presenta las mediciones obtenidas de los modelos virtuales generados.



**Tabla 4.**  
Medida de las cotas en estudio con dos réplicas

Ítem	Ilumi- nación	Cáma-ra	Nro. de fotos	b1		b2		b3		c1		c2	
				N1	N2	N1	N2	N1	N2	N1	N2	N1	N2
1	-1	-1	-1	10,05	10,03	9,50	9,45	10,12	10,03	10,04	9,95	5,37	5,40
2	1	-1	-1	10,02	10,03	9,56	9,56	10,04	10,09	10,01	9,99	5,51	5,44
3	-1	1	-1	9,99	9,86	9,52	9,32	10,10	10,06	10,00	9,88	5,54	5,32
4	1	1	-1	9,99	10,01	9,51	9,48	10,07	10,16	9,99	10,01	5,36	5,40
5	-1	-1	1	10,07	9,98	9,34	9,61	10,13	10,10	10,04	9,97	5,31	5,48
6	1	-1	1	10,00	10,02	9,40	9,54	10,13	10,14	9,99	10,02	5,47	5,42
7	-1	1	1	10,05	10,02	9,32	9,33	10,12	10,15	10,05	10,04	5,70	5,35
8	1	1	1	10,01	10,13	9,43	9,33	10,10	10,16	10,03	10,07	5,46	5,37

*Nota:* Se tiene las mediciones ordenadas, medidas con el mismo instrumento de medición.

*Fuente:* Elaboración propia.



## ANÁLISIS FACTORIAL

Tras el análisis factorial  $2^3$  con 2 réplicas, se obtiene un valor p, por cada destacando el factor de mayor tendencia, como se ve en la Tabla 5.

**Tabla 5.**  
Resultado del análisis factorial

<b>Cota</b>	<b>Factor de Mayor Tendencia</b>	<b>Valor P (tendencia)</b>	<b>Nivel crítico para mínimo error</b>	<b>Protocolo Óptimo</b>
b1	Interacción Cámara *	0,073	Nro. de fotos	Cámara Alta, Nro. de fotos
	Nro. de Fotos		Bajo - Cámara Alto	Bajo, Iluminación Bajo
b2	Cámara	0,096	Cámara Alta	Cámara Alta, Nro. de Fotos Alto, Iluminación Bajo
b3	Nro. de fotos	0,055	Nro. de fotos	Cámara Baja, Nro. de Fotos
			Bajo	Bajo, Iluminación Bajo
c1	Nro. de fotos	0,089	Nro. de fotos	Cámara Alta, Nro. de Fotos
			Bajo - Cámara Alto	Bajo, Iluminación Bajo
c2	Interacción Iluminación *	0,235	Nro. de fotos	Ruido - adoptar el protocolo
	Cámara		Bajo	global

*Nota:* Esta es la Tabla resumen del análisis factorial de las cinco cotas estudiadas, resaltando en cada una el protocolo óptimo, para obtener el menor erro absoluto. *Fuente:* Elaboración propia.

Tras el análisis factorial y la evaluación de la probabilidad de éxito, se establece el siguiente protocolo de captura para maximizar la precisión metrológica:

- Cámara: Tecno Camon 40 PRO (Nivel Alto)
- Nro. De Fotos: 60 Fotografías (Nivel Bajo)
- Iluminación: 230 lux (Nivel Bajo)



## DETERMINACIÓN DEL ERROR ABSOLUTO ENTRE EL PATRÓN DE CALIBRACIÓN, LA FOTOGRAMETRÍA Y EL VALOR NOMINAL

En esta subsección se evalúa la exactitud dimensional comparando los tres estados del estudio: el diseño teórico (Nominal), la pieza física fabricada (Patrón) y la reconstrucción digital (Fotogrametría). En la Tabla 2 se consolidan los valores obtenidos utilizando la combinación de factores más favorables identificada en el protocolo experimental de fotogrametría. Los valores obtenidos en el estudio, se ve en la Tabla 6.

**Tabla 6.**  
Resultados comparativos del patrón de calibración, Fotogrametría y escáner intraoral

Cota	Valor	Modelo 3D fotogrametría	
	nominal [mm]	Patrón de calibración [mm]	[mm]
b1	10,00	10,02	9,99
b2	10,00	9,90	9,52
b3	10,00	10,12	10,10
c1	10,00	10,03	10,00
c2	6,00	5,94	5,54

*Nota:* Se trabaja todos los valores en milímetros.

*Fuente:* Elaboración propia

Para determinar la viabilidad clínica del proceso de manufactura, se calculó el error absoluto entre el valor nominal y el patrón físico. Según el criterio de McLean y Von Fraunhofer (1971), se considera una discrepancia marginal aceptable si el error es inferior a 120  $\mu\text{m}$  (0,12 mm). El error absoluto del patrón de calibración vs la medida nominal se ve en la Tabla 7.



**Tabla 7.**

Error absoluto obtenido con la Medida Nominal vs patrón de calibración

ITEM	Valor	Patrón de	Error Absoluto	Observación
	nominal [mm]	calibración [mm]	[mm]	$E \leq 120$ [ $\mu\text{m}$ ]
b1	10,00	10,02	0,02	Acceptable
b2	10,00	9,90	0,10	Acceptable
b3	10,00	10,12	0,12	Acceptable
c1	10,00	10,03	0,03	Acceptable
c2	6,00	5,94	0,06	Acceptable

*Nota:* Se establece el umbral crítico de 120  $\mu\text{m}$  para la adaptación marginal en restauraciones protésicas, según el criterio de McLean y Von Fraunhofer (1971).

*Fuente:* Elaboración propia.

Finalmente, se evaluó la precisión del método de captura digital comparando la fotogrametría frente a la medida nominal, aplicando el mismo criterio de tolerancia clínica.

Error absoluto obtenido con la Fotogrametría vs la medida nominal, ver Tabla 8.



**Tabla 8.**

Error absoluto obtenido con la Medida Nominal vs Fotogrametría

ITEM	Valor nominal	Modelo 3D	Error Absoluto	Observación
	[mm]	fotogrametría	[mm]	$E \leq 120$ [ $\mu\text{m}$ ]
b1	10,00	9,99	0,01	Aceptable
b2	10,00	9,52	0,48	No aceptable
b3	10,00	10,10	0,10	Aceptable
c1	10,00	10,00	0,00	Aceptable
c2	6,00	5,54	0,46	No aceptable

*Nota:* Se considera un umbral crítico de 120  $\mu\text{m}$  para aplicaciones en rehabilitación oral

*Fuente:* Elaboración propia

## REGRESIÓN LOGÍSTICA

Se identificaron dos puntos de control clave: la cota c2 ( $E = 0.46$  mm) como indicador de las deficiencias del protocolo, y la cota c1 ( $E = 0.03$  mm) como referente para predecir condiciones de medición óptimas según la Tabla 9.

**Tabla 9.**

Datos para la regresión logística de la Cota c1

Iluminación	Cámara	Nro. De		error Absoluto < 0,03 [mm]
		fotos	N1 Cota c1 [mm]	
-1	-1	-1	10,04	no
1	-1	-1	10,01	si
-1	1	-1	10	si
1	1	-1	9,99	si
-1	-1	1	10,04	no
1	-1	1	9,99	si
-1	1	1	10,05	no
1	1	1	10,03	no
-1	-1	-1	9,95	no
1	-1	-1	9,99	si



-1	1	-1	9,88	no
1	1	-1	10,01	si
-1	-1	1	9,97	no
1	-1	1	10,02	si
-1	1	1	10,04	no
1	1	1	10,07	si

*Nota:* Se utilizó la tercera fila de datos de la Tabla 4.

*Fuente:* Elaboración propia.

En la Tabla 10 presenta los coeficientes de la regresión logística obtenidos mediante el software Minitab

**Tabla 10.**  
Tabla de coeficientes de regresión logística

<b>Término</b>	<b>Coef</b>	<b>EE del coef.</b>	<b>Valor Z</b>	<b>Valor p</b>	<b>FIV</b>
Constante	-0	315	-0,00	1,000	
Iluminación					
-1	-12	315	-0,04	0,970	99290,41
Cámara					
-1	-0	315	-0,00	1,000	1,50
Nro. de Fotos					
-1	4	315	0,01	0,990	99290,41
Iluminación*Cámara					
-1 -1	-4	315	-0,01	0,990	99290,41
Iluminación*Nro. de Fotos					
-1 -1	-0	315	-0,00	1,000	1,50
Cámara*Nro., de Fotos					
-1 -1	-4	315	-0,01	0,990	99290,41
Iluminación*Cámara*Nro. de Fotos					
-1 -1 -1	0	315	0,00	1,000	1,50



*Nota:* Los valores elevados del Factor de Inflación de la Varianza (FIV) son una consecuencia matemática de la saturación del modelo  $2^3$  al incluir todos los términos e interacciones con un número limitado de grados de libertad. Dado que el objetivo del modelo es la predicción de la probabilidad de éxito y no la inferencia de parámetros individuales, la presencia de multicolinealidad no invalida la capacidad predictiva del modelo logístico presentado.

Fuente: Elaboración propia.

Para la ecuación 1, usaremos los coeficientes calculados en el programa Minitab que se ven en la Tabla 10. Ahora la ecuación lineal queda como:

*Ecuación 1: Ecuación lineal con coeficientes*

$$Y' \approx \beta_0 - 12X + 4Z - 4XY - 4YZ$$

*Donde:*

$\beta_0$  : Constante

$X$  : Predictor iluminación

$Y$  : Predictor cámara

$Z$  : Predictor Nro. de fotos

Cada predictor tiene solo 2 valores posibles

Si Predictor = *Nivel Bajo*  $\rightarrow X_x = -1$

Si Predictor = *Nivel Alto*  $\rightarrow X_x = +1$

Con los predictores de Cámara en nivel alto y Número de fotos en nivel bajo, tenemos: Ecuación lineal con predictor cámara en nivel alto y predictor de Número de Fotos en nivel Bajo

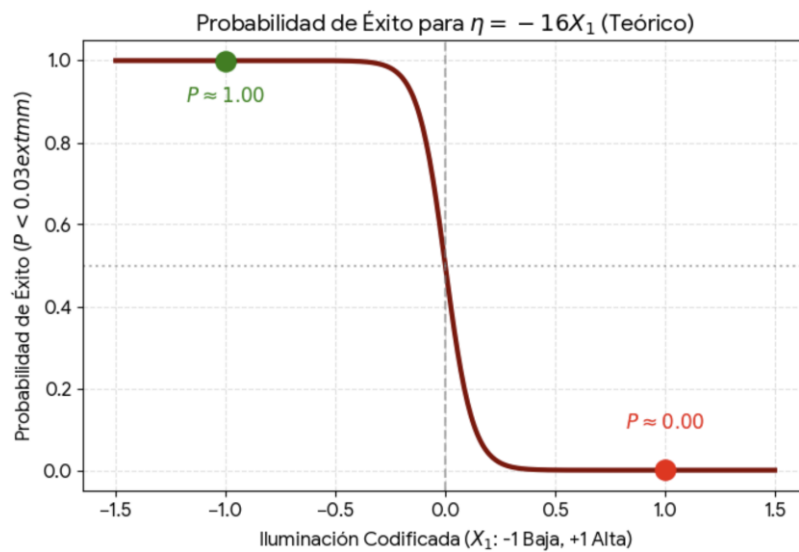
$$Y' \approx 0 - 12X + 4(-1) - 4X(+1) - 4(+1)(-1)$$

$$Y' \approx -16X$$

Reemplazando, este valor en la ecuación 1, nos da como resultado la siguiente gráfica (Figura 2).



**Figura 2:**  
Gráfica de la regresión logística para la probabilidad de éxito



*Nota:* En esta gráfica se puede observar la curva de probabilidad de éxito de que la cota tenga un error absoluto  $<0.03 \text{ mm}$ , disminuye drásticamente cuando el nivel de iluminación pasa de un nivel bajo a un nivel alto, en base a esto el nivel bajo de la iluminación es el más crítico.

*Fuente:* Elaboración propia.

Como se muestra en la Figura 2, la probabilidad de éxito disminuye drásticamente al aumentar la iluminación.

## RESULTADOS DE LA REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD

En base a lo recomendado por el diseño factorial se eligió los modelos reconstruidos que tenían la iluminación con nivel bajo, la cámara con nivel alto e Iluminación de nivel bajo. Se incluyó un operador para que realice dos veces la medición de las mismas piezas medidas por el operador principal, dando como resultado la Tabla 11

**Tabla 11.**  
Medidas para el estudio de repetibilidad

Orden Corrida	Operadores	Partes	Mediciones
1	Operador 1	c1	10
2	Operador 1	b2	9,52
3	Operador 1	b1	9,99
4	Operador 1	b3	10,1
5	Operador 1	c2	5,54
6	Operador 2	b1	9,99
7	Operador 2	b2	9,43
8	Operador 2	c2	5,39
9	Operador 2	c1	10,04
10	Operador 2	b3	10,08
11	Operador 1	b1	9,86
12	Operador 1	b3	10,06
13	Operador 1	b2	9,32
14	Operador 1	c1	9,88
15	Operador 1	c2	5,32
16	Operador 2	b1	9,86
17	Operador 2	c2	5,31
18	Operador 2	c1	9,81
19	Operador 2	b2	8,99
20	Operador 2	b3	10,04

*Nota:* Se utilizó la tercera fila de datos de la Tabla 4.

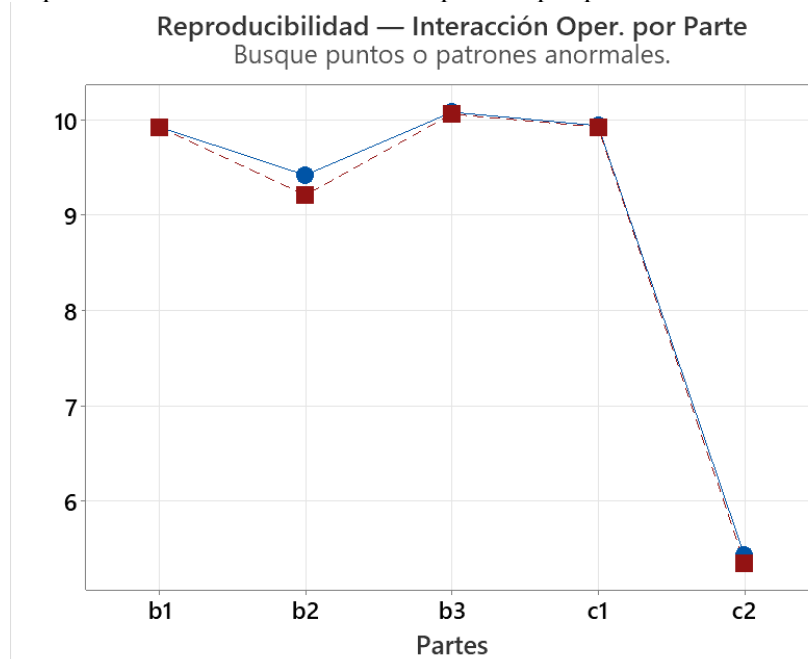
*Fuente:* Elaboración propia.

En base a los datos de la Tabla 11 se analiza la repetibilidad y reproducibilidad de la validación metrológica.



La reproducibilidad vs Interacción del operador por parte se ve en la Figura 3.

**Figura 3:**  
Reproducibilidad – Interacción del operador por parte



*Nota:* Se observa que existe una diferencia visible en la Cota b2, al momento de tomar la medida, pero es una variación pequeña.

*Fuente:* Elaboración propia.

## DISCUSIÓN

El análisis metrológico realizado demuestra que la fotogrametría de bajo costo es capaz de competir con sistemas de digitalización profesional bajo condiciones controladas. La obtención de errores inferiores a 120  $\mu\text{m}$  en las cotas principales (b1, b3, c1) valida el uso de este protocolo para aplicaciones de ortodoncia o modelos de estudio, donde la precisión requerida se alinea con los estándares de McLean y Von Fraunhofer.

Un hallazgo crítico fue la influencia de la Iluminación. Contrario a lo que podría suponerse, un nivel de iluminación bajo (luz ambiental controlada) resultó más favorable que una iluminación intensa. Esto se atribuye a que el exceso de luz en materiales de resina MSLA puede generar brillos especulares que confunden los algoritmos de correspondencia (*feature matching*) del software de fotogrametría, introduciendo ruido en la nube de puntos.

Por otro lado, el error observado en las cotas b2 y c2 (zonas de mayor profundidad) revela una limitación intrínseca de la fotogrametría convencional frente a los escáneres activos: el ángulo de oclusión. Al ser

zonas estrechas o profundas, la cámara no logra captar suficientes ángulos de visión, lo que reduce la densidad de puntos y, por ende, la precisión dimensional. Esto coincide con lo reportado en estudios de digitalización dental donde las zonas interproximales suelen presentar mayores discrepancias.

Finalmente, el resultado del Gage R&R (6,4%) es un indicador de robustez. Un porcentaje de variación tan bajo demuestra que el protocolo no depende de la pericia subjetiva del operador, sino de la solidez del flujo de trabajo digital propuesto, lo que facilita su replicabilidad en entornos clínicos reales.

## CONCLUSIONES

Se determinó que la fotogrametría dental es un método metrológicamente viable para la digitalización de modelos, logrando precisiones dentro del umbral clínico de 120  $\mu\text{m}$  en la mayoría de las cotas analizadas (b1, b3 y c1), validando su uso en aplicaciones de odontología digital de bajo costo.

El análisis factorial y la regresión logística identificaron a la Iluminación como la variable de mayor impacto en la fidelidad del modelo 3D. Se concluye que un nivel de iluminación bajo, combinado con una cámara de alta resolución y un número de fotos de nivel bajo, maximiza la probabilidad de éxito clínico según el modelo probabilístico desarrollado.

El estudio Gage R&R confirmó la estabilidad del sistema con una variación total del 6,4%. Al ser un valor inferior al 10%, el protocolo se clasifica como un método de medición altamente confiable e independiente del operador, garantizando la repetibilidad de los resultados.

Se observó que la precisión disminuye en zonas de mayor complejidad geométrica o profundidad (cotas b2 y c2), donde el error absoluto superó el umbral de McLean, sugiriendo la necesidad de optimizar el ángulo de captura en dichas áreas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Beyer, M., Scheller, L., Burde, A. V., Abazi, S., Sommacal, A., Seifert, L., Sharma, N., & Thieringer,

F. M. (2025). Comparative evaluation of SLA and DLP 3D printing in dental implant guides:

Impact on manufacturing accuracy, speed, and resin usage. *Coatings*, 13(10), 471.

<https://doi.org/10.3390/23046767>

Herrera, M., Catalán, A., Flores, M., & Martínez, A. (2012). Discrepancia marginal y microfiltración

en cofias de corona fabricadas con tres sistemas CAD/CAM: un estudio in vitro. *Open Journal*

*of Stomatology*, 2(4), 312-317. <https://doi.org/10.4236/ojst.2012.24056>



International Journal of Morphology. (2015). Generación de modelos dentales 3D basados en escaneo tridimensional para estudiar la morfología de los dientes permanentes. *International Journal of Morphology*, 33(4), 1435-1440.

[https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-95022015000400038](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-95022015000400038)

McLean, J. W., & Von Fraunhofer, J. A. (1971). The estimation of cement film thickness by an in vivo technique. *British Dental Journal*, 131(3), 107-111. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.4802708>

Park, J.-M., Jeon, J., Koak, J.-Y., Kim, S.-K., & Heo, S.-J. (2020). Dimensional accuracy and surface characteristics of 3D-printed dental models. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 123(5), 724-730. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.03.003>

Rodríguez, J. (2023). *Una revisión de la impresión 3D en odontología: tecnologías, factores que afectan y aplicaciones* [Informe técnico]. Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (ICTP-CSIC). <https://digital.csic.es/handle/10261/355048>

Salles, P. (2024). *Análisis de la variación dimensional de modelos 3D obtenidos con dos impresoras de resina* [Tesis de grado, Universidad de los Andes]. Repositorio Académico.

[https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2452-55882024000300134](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2452-55882024000300134)

Tuncay, I., Gultekin, P., & Orhan, K. (2019). Influence of the post-polymerization process on the dimensional accuracy of 3D-printed dental models. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 121(3), 540-545. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2018.10.026>

