

Geo-Estadística Aplicada para el Realce de Imágenes Digitales Ordinarias

Geo-Statistics Applied for the Realization of Ordinary Digital Images

Rebolledo, R.

Fundación Instituto de Ingeniería, Centro de Procesamiento Digital de Imágenes (FII-CPDI)

rafael.rebolledo@unimilitar.edu.co

Fecha de recepción: junio de 2018 / **Fecha de aceptación:** septiembre de 2018

Resumen

Este estudio consistió en aplicar diversas técnicas geo-estadísticas en el realce de imágenes digitales, con base en el hecho de que la estructura matricial de dichas imágenes permite su interpretación en términos geoespaciales y su manipulación geo-estadística con fines de realce. El planteamiento experimental tomó una imagen digital de base que fue sometida a diversas ediciones, para conformar el *dataset* que permitiera su adecuación al análisis geo-estadístico. Luego se utilizaron diversas técnicas de interpolación geo-estadísticas y de cada una de ellas se obtuvieron resultados. Para la evaluación de la calidad de los resultados fue desarrollado un análisis comparativo, orientado desde dos perspectivas independientes (evaluación de errores absolutos y validación cruzada), como base de la evaluación y la sistematización del proceso de selección del mejor estimador. Producto de este análisis se evidenció que la interpolación basada en función polinomial localizada resultó ser el mejor estimador para definir la razón de variación espacial que caracteriza las peculiaridades de la imagen de estudio. Se entiende que existe la posibilidad de que distintas imágenes sean más afines a otras técnicas de interpolación espacial, y es aquí donde la sistematización del proceso de evaluación de calidad demuestra su valor. Finalizado el estudio, se comprobó la factibilidad de desarrollar un análisis comparativo y sistemático de distintas opciones de interpolación espacial, con miras a relajar la calidad visual de una imagen digital. El producto resultante demostró ser más detallado que la imagen original. De igual modo, siendo que la razón de variación espacial de dicho producto es parametrizada, las posibilidades de re-escalamiento no tiene límites y esto constituye un valor adicional del estudio.

Palabras clave: Geo-estadística, imagen digital, interpolación, *dowscaling*

Abstract

This study consisted of applying various geo-statistical techniques in the enhancement of digital images, based on the fact that the matrix structure of these images allows their interpretation in geospatial terms and their geo-statistical manipulation for enhancement purposes. The experimental approach took a basic digital image that was submitted to different editions, to conform the dataset that would allow its adaptation to the geo-statistical analysis. Then various geo-statistical interpolation techniques were used and results were obtained from each of them. For the evaluation of the quality of the results, a comparative analysis was developed oriented from two independent perspectives (evaluation of absolute errors and cross validation), as a basis for the evaluation and systematization of the selection process of the best estimator. The result of this analysis was that interpolation based on localized polynomial function was the best estimator to define the spatial variation rate that characterizes the peculiarities of the study image. It is understood that there is the possibility that different images are more related to other spatial interpolation techniques, and this is where the systematization of the quality evaluation process demonstrates its value. After the study, the feasibility of developing a comparative and systematic analysis of different spatial interpolation options with a view to relating the visual quality of a digital image was verified. The resulting product proved to be more detailed than the original image, in the same way, since the spatial variation rate of said product is parameterized, the possibilities of re-escalation have no limits and this constitutes an additional value of the study.

Keywords: Geo-statistics, Digital Image, Interpolation, downscaling.

Introducción

Desde la perspectiva práctica, los procedimientos geo-estadísticos han sido utilizados principalmente para sistematizar procesos de interpolación espacial y más recientemente para desarrollar interpolación espacio-temporal. Sin embargo, en esencia, su utilidad no debería estar limitada a este tipo de aplicaciones. Este estudio presenta una de una aplicación no convencional de técnicas geo-estadísticas en el realce de imágenes digitales, específicamente, la mejora en la calidad de detalles visibles.

La idea de esta propuesta se fundamenta en el aprovechamiento de la estructura matricial de las imágenes digitales para su procesamiento y su interpretación en términos de una variable espacialmente definida que, como tal, es sujeta a la manipulación geo-estadística con fines de realce.

La hipótesis planteada es la siguiente: la implementación y análisis adecuado de procedimientos geo-estadísticos en una imagen digital ordinaria, constituyen una opción para mejorar la resolución espacial de la misma y con ello, la calidad de los detalles visibles en dicha imagen.

Entendiendo que la calidad de los detalles visibles de una imagen está definida por la resolución espacial de dicha imagen, se desarrolló una metodología que, basada en la aplicación de diversas técnicas de interpolación espacial, mejore significativamente la resolución espacial, tal como lo hace el procedimiento de *downscaling* en un mapa temático.

Puede que tras la revisión exhaustiva del estado del arte sobre este tema, no parezca novedoso el utilizar técnicas geo-estadísticas para el realce espacial de imágenes digitales ordinarias, lo cual es perfectamente factible en el desarrollo de proyectos experimentales. Sin embargo, lo que resulta más novedoso en esta propuesta es el análisis comparativo, orientado desde dos perspectivas independientes, como base de la evaluación y la sistematización del proceso de selección del mejor estimador.

Marco Teórico

La geo-estadística, es una ciencia aplicada que involucra el estudio estadístico de fenómenos naturales definidos espacial o temporalmente. Matheon, la define como:

“la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales” (Journel & Huijbregts, 1978).

Ello presupone que los fenómenos naturales obedecen a condiciones de aleatoriedad, al menos en términos de representatividad espacial y temporal, lo que permite su interpretación estadística. Ahora bien, ¿cuál es la intensión que motiva el reconocimiento en interpretación de fenómenos naturales, en términos de espacio y de tiempo? El poder interpretarlos y predecir su comportamiento ante cualquier situación, precisamente, se conoce como interpolación. La interpolación espacial y temporal es el fin de la geo-estadística, por ello se parte de la premisa de la continuidad, tanto en espacio como

en tiempo. Si por alguna razón, el espacio analizado deja de ser continuo en algún lugar, cualquier interpolación es errada. Lo mismo ocurre cuando se analiza la continuidad en la variable tiempo. En este contexto, la definición continua de un fenómeno natural en términos espaciales se denomina variable regionalizada (Ovalles, 1994). Partiendo de la necesaria continuidad espacial y de la premisa de aleatoriedad, una variable regionalizada se caracteriza por cierto grado de auto-correlación que la caracteriza, según lo cual las realizaciones de dicha variable se asemejan entre sí, proporcionalmente a la distancia espacial que las separa. Precisar este aspecto tan singular de cada variable es en cierto sentido, el principio básico en que se basan las técnicas de interpolación espacial más reconocidas. La mayoría de los fenómenos naturales pueden ser definidos como variables regionalizadas, tanto en tiempo como en espacio (Melo, 2012).

Históricamente la geo-estadística ha estado dirigida a interpretar fenómenos prácticos de tipo geográfico. Son reconocidos como fundamentales para la geo-estadística, los trabajos de DG Krige (1951), orientados a la evaluación y explotación de las minas de oro de Rand, África del Sur. Desde allí, se han desarrollado cada vez más aplicaciones orientadas a dar soluciones tecnológicas en otros campos geo-científicos y ambientales, sin embargo, son poco conocidas las aplicaciones al micro-espacio, aun cuando sus fundamentos son perfectamente compatibles con este universo espacial.

Una imagen digital es un conjunto organizado de valores que representan una imagen gráfica. En una imagen digital, los

valores se organizan en un mapa en forma de cuadrícula del espacio cubierto por la imagen captada, por lo que cada localización puede ser referida, siguiendo un arreglo matricial. Los valores representativos de la imagen en cada localización se llaman píxeles y son por definición, la unidad de información elemental homogénea de una imagen digital. De acuerdo con este criterio, más allá del píxel, no es posible establecer información digital. Esta limitación propia de toda imagen digital se le denomina resolución. La resolución de una imagen digital es el grado de detalle de una imagen digital, medido en términos de densidad de píxeles por unidad de área o en términos de tamaño del píxel.

Desde la perspectiva geo-estadística, una imagen digital supone, en términos esenciales, un micro espacio, donde la variable regionalizada, que es la imagen gráfica captada, se manifiesta espacialmente, por medio de los píxeles. En ese orden de ideas, el realce de imagen digital consiste en la aplicación de técnicas de edición gráfica, con la finalidad de resaltar alguna cualidad de la imagen. A los efectos de esta investigación, el realce pretende superar la barrera de la resolución inicial de la imagen para que pueda ser interpretada, más allá de la limitación propia del píxel, pudiendo mejorar infinitamente su nivel de detalle.

La mayoría de los procesos de relace han sido desarrollados por principios morfológicos, porque se orientan a resaltar una cualidad en particular de la imagen. La propuesta de esta investigación persigue realzar la resolución, mediante procesos

geoestadísticos, así mismo, realzar la resolución espacial de una imagen digital implica ir más allá de las limitaciones propias del píxel, sin embargo, la mayoría de los análisis subpíxel, se basan en principios espectrales, probabilísticos y ontológicos, pero se han desarrollado para procesos de clasificación y no para mejorar la resolución.

Datos. Dado que esto es una propuesta experimental, cuyo principal objetivo es ensayar la hipótesis planteada, se consideró poco relevante escoger una imagen digital en

particular, los únicos criterios que privaron para su selección fueron la existencia de elementos característicos dignos de resaltar y que fuese una imagen pancromática. Esta última condición, se debe a que en los momentos de desarrollo de este estudio, aún no estaba claro cómo manejar el impacto de métodos geo-estadísticos en la descomposición multicanal que constituye una imagen en color. La imagen utilizada en este experimento es una sección de la imagen “Penguins.jpg” (ver figura 1) que viene como demostración por defecto en el *software Windows 7*.



Figura 1. Imagen original en color (Penguins.jpg).

Se escogió esta imagen por ser ampliamente conocida, presentar buenos contrastes y formas agudas (picos), que constituyen elementos claves, cuando se pretende relazar digitalmente una imagen. Siendo que el objetivo de este estudio contempla

desarrollar un procedimiento metódico que logre el realce espacial de la imagen, previo a la incorporación en este estudio, la imagen, que originalmente es a color, se procesó para llevarla a un modelo pancromático (escala de grises).

Este procedimiento eliminaría la presencia de variables que no aportarían mucho al análisis de realce espacial, como la composición de color en el análisis. Posteriores estudios incorporarán elementos de este tipo para lograr otro tipo de realce. Finalmente, a los efectos de desarrollar el procedimiento experimental se seccionó dicha imagen

para hacerla más pequeña y manejable para los recursos computacionales limitados, con los que se cuenta para este estudio. La imagen utilizada en este estudio se muestra en la figura 2 y tiene 120,132 organizados matricialmente en un arreglo de 284 píxeles de alto por 423 de ancho.

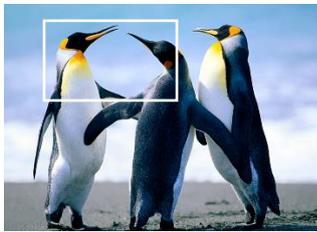


Figura 2. Imagen de estudio.

Metodología

Este estudio se fundamenta en un procedimiento hipotético inductivo, en el que se esperaba que la manipulación geo-estadística de los datos digitales de la imagen permitiera una definición más precisa y detalla. La propuesta metodológica se presenta entonces como un análisis experimental desarrollado sobre un conjunto de modelo estadístico aplicado a la imagen de estudio y a partir del cual se generaran distintas imágenes sintéticas

que suponen distintas estrategias de realce. Finalmente, y con base a este conjunto de imágenes de realce, se desarrolló un procedimiento sistemático de análisis comparativo que permitió determinar el modelo geo-estadístico que mejor define las peculiaridades de la imagen original y genera en consecuencia el mejor realce. Este proceso constituye en gran medida, el mayor aporte de esta investigación, la comparación metódica de diversas opciones igualmente válidas. En la práctica se espera que el producto desarrollado permita apreciar en mejores condiciones y más

claramente detalles de la imagen que en su versión original se encuentran limitadas por la resolución inicial de toma y el tamaño del píxel. El siguiente cuadro ilustrado en

la figura 3, constituye la estructuración esquemática y conceptual del proceso metodológico anteriormente descrito.

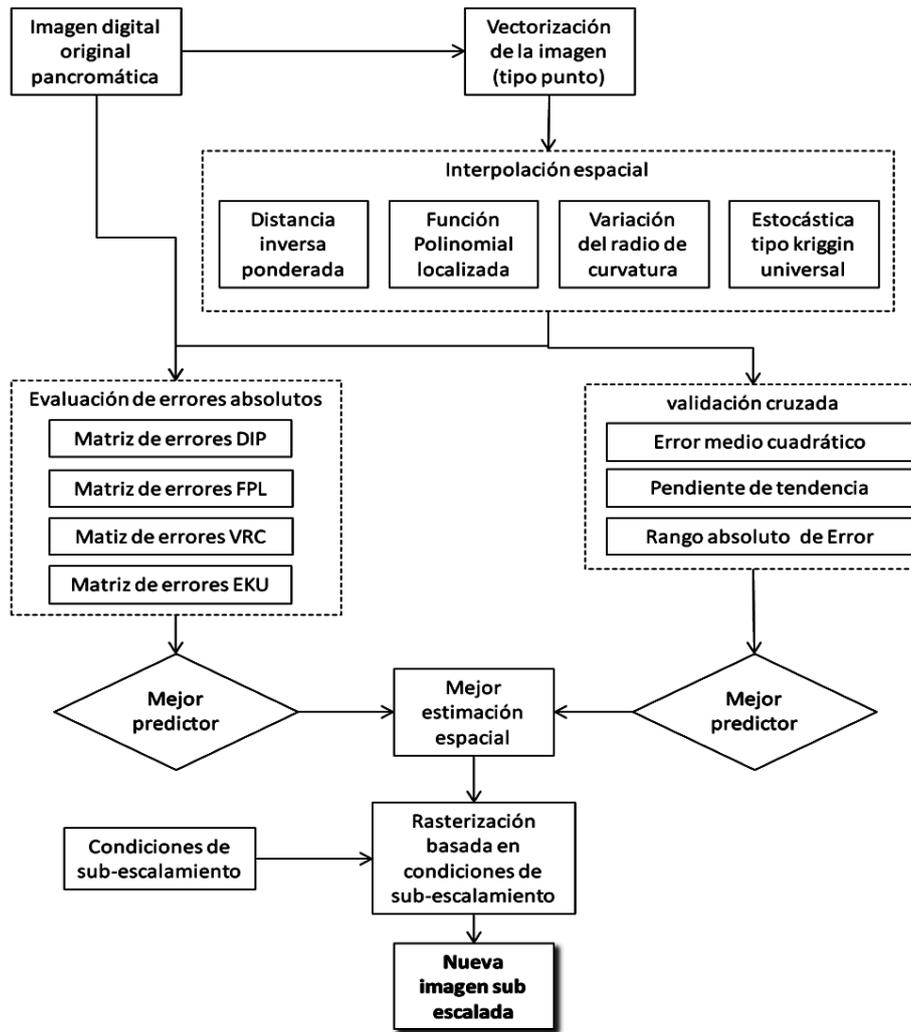


Figura 3. Esquema conceptual de la propuesta metodológica.

El esquema presentado ilustra una propuesta metodológica simple, con una sola entrada, un pre-procesamiento, tres procedimientos (uno operativo y dos de análisis) y una sola salida.

Pre-procesamiento: vectorización de imagen. Es el procedimiento mediante el cual se transforma la estructura matricial de la imagen en un formato adecuado para el manejo geo-estadístico, el resultado es

una nube regular de puntos, que constituye el grupo de datos que serán analizados y donde cada punto constituye el centro de un píxel y cuyo único atributo en el nivel digital de dicho píxel.

Interpolación espacial. Constituye el procedimiento operativo, mediante el cual se practican distintos procedimientos de interpolación espacial sobre la misma nube de puntos. En este estudio se utilizaron cuatro procedimientos de interpolación espacial: Interpolación por Distancia Inversa Ponderada (DIP), Función Polinomial Localizada (FPL), Variación del Radio de Curvatura (VRC-spline) y Kriggin Universal (EKU).

Validación cruzada. Constituye un proceso de autoevaluación que determina la capacidad predictiva de cada procedimiento de interpolación. En esta, básicamente se sustrae sistemáticamente uno por uno, cada valor generado en la interpolación y se reestima a partir de los restantes. La reestimación genera un nuevo valor que difiere levemente del valor sustraído. Esta diferencia constituye un error, el conjunto total de errores (120132 errores en este caso) se plotean en un diagrama de dispersión, cuyas coordenadas vienen dadas por el siguiente arreglo: abscisas → ID del punto, ordenadas → valor del error.

En condiciones ideales, los errores entre el valor sustraído y el reestimado deben ser muy pequeñas, de hecho, en la medida que estas diferencias sean menores, mejor es la capacidad predictiva del modelo de interpolación evaluado. Así, el diagrama de dispersión ideal debería presentarse como una secuencia de puntos ubicados

en la recta $y=0$. En ese orden de ideas, una manera para determinar la calidad predictiva analizada, es a través de la observación de tres parámetros:

- a) Error medio cuadrático: promedio global de los valores absolutos de cada error.
- b) Pendiente de la línea de tendencia: Siendo que la tendencia lineal orienta el diagrama de dispersión, la pendiente de dicha línea de tendencia indica qué tan horizontal es el diagrama de dispersión. En condiciones ideales, el valor de la pendiente de la línea de tendencia debería ser muy cercano a cero ($m=0$) y el corte con el eje y debe ser muy cercano a cero ($b=0$).
- c) Valor absoluto del rango de variación del error: De cierta manera es una medida de la amplitud de la nube de dispersión y se obtiene, sumando el máximo error por exceso (positivo) y el máximo error por defecto (negativo). Lo esperado en condiciones ideales es que este rango sea muy cercano a cero.

Evaluación de Errores absolutos. Este procedimiento constituye la evaluación clave en esta propuesta, pues en ella se cuantifica qué tan fielmente puede ser reproducida la imagen original, a partir de las cuatro interpolaciones desarrolladas. Operativamente, la cuantificación de esta cualidad se logra, generando una matriz de errores absolutos para cada interpolación. Para ello, se transforma la interpolación en un ráster con las mismas cualidades de la imagen original (mismo tamaño de imagen y mismo tamaño de píxel) luego, mediante

álgebra de mapas se resta la estimación de la imagen original. en condiciones ideales el resultado debería ser un ráster del mismo tamaño de la imagen, compuesto exclusivamente de ceros.

Finalmente, a partir de los resultados de la validación cruzada y de la evaluación de errores absolutos, se obtuvo el mejor interpolador espacial de la imagen. En principio, este interpolador descubre las particularidades de la razón de variación espacial que domina la imagen estudiada, de ahí que pueda ser utilizado para su realce en la medida que el analista así lo requiera. Consecuentemente, con base a este estimador, se puede rasterizar la interpolación con tamaños de píxel inferiores al original, produciendo de esta forma una imagen mejorada con mayor profusión de detalles.



Imagen de estudio

Resultados Experimentales

La propuesta experimental de este estudio se llevó a la práctica sobre la plataforma SIG que ofrece el *software* especializado ARC GIS de la casa ESRI.

Resultados de la vectorización de imagen.

El primer paso consistió en llevar la imagen desde su estructura ráster original a una nube regular de puntos. En ArcGis, esto se logra utilizando el comando *Raster_to_Point* del subgrupo *From_raster*, del grupo *Convesion_Tools* del *Arc_Tool_Box*. En este procedimiento se indica el ráster que se pretende convertir a puntos, el valor que se desea conservar como atributo y el nombre que tendrá el archivo de salida (imagen convertida en puntos). La figura 4 ilustra los resultados de este procedimiento.

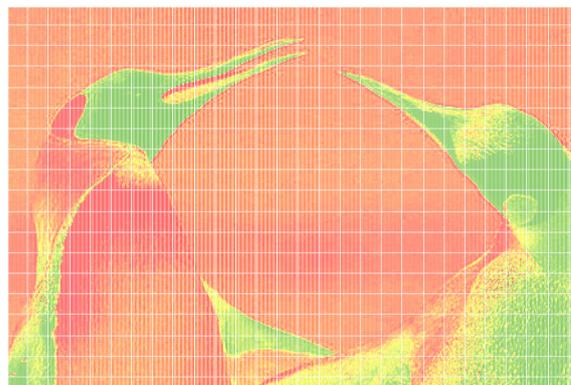


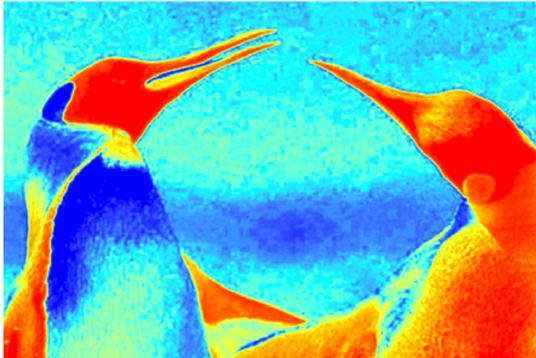
Imagen convertida en puntos

Figura 4. Resultados de la vectorización de la imagen.

Resultados de la Interpolación espacial.

Tal como se indicó en la descripción de la propuesta metodológica, este paso consiste en la aplicación independiente de cuatro modelos de interpolación espacial, con base en los puntos que constituyen la imagen convertida en puntos. Para ello se utiliza el paquete especializado *Geostatistical Analyst*,

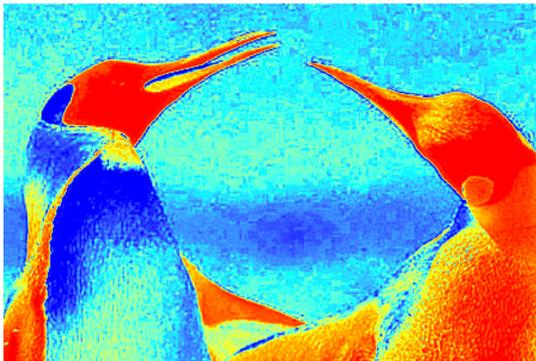
de *ArcMap*, se estudian las características de los datos en el visualizador tridimensional y la superficie de tendencia. Con ellos se alimentaron los modelos de interpolación anteriormente mencionados. La siguiente serie de figuras (figura 5) ilustra los resultados de las interpolaciones y sus principales parámetros.



Distancia inversa ponderada.

Parámetros (DIP):

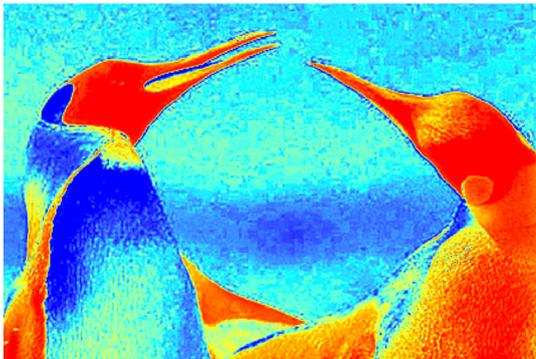
- Potencia: 2
- Type: Standard
- Vecindad a incluir: 15
- Incluir al menos: 10
- Sectorización: Full
- Angulo: 0
- Semieje mayor: 127,0268
- Semieje menor: 127,0268



Función Polinomial localizada

Parámetros (FLP):

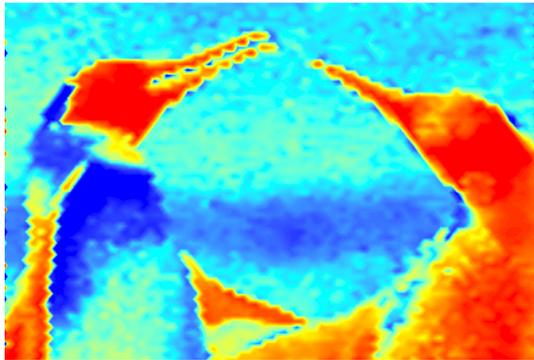
- Potencia: 4
- Ponderación: 2,148968
- Vecindad a incluir: todo
- Incluir al menos: 10
- Sectorización: Full
- Angulo: 0
- Semieje mayor: 3,2988
- Semieje menor: 3,2988



Spline o Variación del radio de curvatura (VRC)

Parámetros:

- Kernel: Spline regularizado
- Parámetro: 4,6136286
- Vecinos a incluir: 15
- Incluir al menos: 10
- Sectorización: Full
- Angulo: 0
- Semieje mayor: 127,0268
- Semieje menor: 127,0268



Kriggin universal (EKU)

Parámetros:

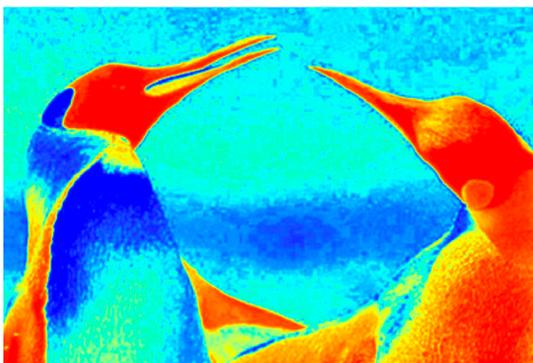
- Tipo de tendencia: tercer orden
- Vecindad a incluir: 5
- Incluir al menos: 2
- Sectorización: cuartos a 45°
- Semieje mayor: 355,5981
- Semieje menor: 300
- Lags: 12, Tamaño del Lag: 30
- Nugget: 13
- Modelo de variograma gaussiano
- Rango: 355,598
- Anisotropía: sí
- Rango menor: 300
- Dirección: 55,213°
- Sill Parcial: 7

Figura 5. Resultados de la interpolación espacial por diversos métodos

Validación cruzada. Como se explicó anteriormente, la validación cruzada consiste en

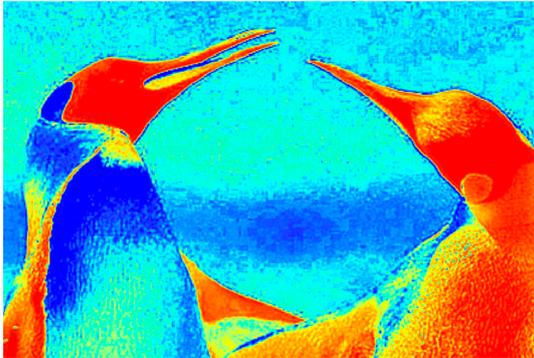
evaluar la capacidad predictiva de cada modelo, a partir de sus propios datos e independientemente de la fuente original. Por ello, se puede decir que es una suerte de autoevaluación. La siguiente secuencia

de figuras (figura 6), resume los resultados de la validación cruzada para cada método de interpolación:



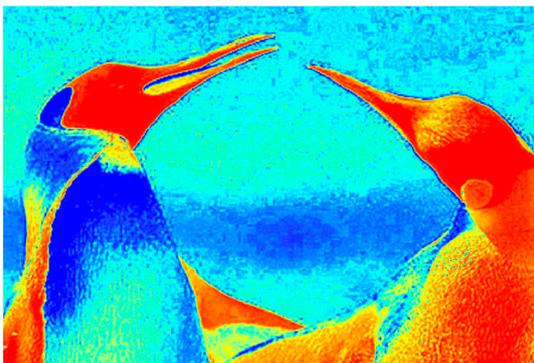
Error promedio:	-0,02815
Error medio cuadrático:	17,88
Función de regresión:	$m=-0,038$
b=	7,576
Máximo defecto:	-171,93
Máximo exceso:	159,55
Rango=331,48	

Distancia Inversa Ponderada (DIP)



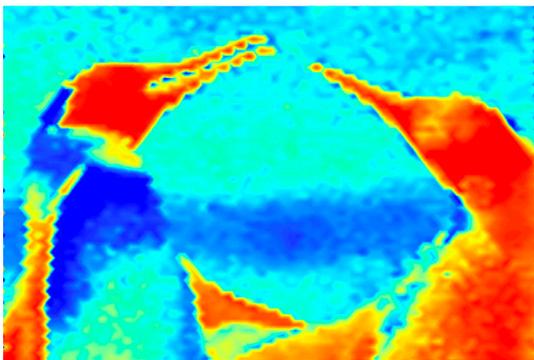
Función Polinomial Localizada (FLP)

Error promedio	-0,007416
Error medio cuadrático:	14,96
Función de regresión	$m=-0,017$
b=	3,500
Máximo defecto:	-171,07
Máximo exceso:	164,78
Rango=335,85	



Splines completamente regularizado (VRC)

Error promedio	-0,00708
Error medio cuadrático:	15,27
Función de regresión	$m=-0,025$
b=	5,007
Máximo defecto:	-163,04
Máximo exceso:	140,09
Rango=303,13	



Kriggin universal (EKU)

Error promedio	-0,021
Error medio cuadrático:	16,61
Función de regresión	$m=-0,024$
b=	4,726
Máximo defecto:	-177,71
Máximo exceso:	159,80
Rango=337,51	

Figura 6. Resultados de la validación cruzada.

Análisis comparativo de la validación cruzada. La siguiente tabla resume los resultados de la validación cruzada efectuada a las cuatro estrategias de

interpolación utilizadas en este estudio, presentando los valores de los parámetros de análisis en cada caso.

Tabla 1. Resumen de los resultados de la validación cruzada.

Método	Error promedio	EMC	m	b	Rango
DIP	-0,028	17,88	-0,038	7,576	331,48
FPL	-0,007	14,96	-0,017	3,500	335,85
SPLINE	-0,007	15,28	-0,025	5,007	303,13
KRIGGIN	-0,021	16,61	-0,024	4,726	337,51
Mejor estimador					
	VRC	FLP	FLP	FLP	VRC

Según los resultados mostrados en la tabla 1 sobre el análisis comparativo, con base en los criterios ideales definidos para cada parámetro que evalúa la capacidad predictiva de cada método de interpolación, es evidente que los mejores resultados se obtienen con la interpolación basada en una función polinomial localizada. De acuerdo con esto, es este método el que tuvo más potencial predictivo. De los cinco parámetros de comparación fue el de mejor desempeño en tres de ellos (error medio cuadrático, pendiente y corte de tendencia) y por poco, el segundo mejor en uno de los parámetros restantes (error promedio), esto muestra un claro dominio sobre las opciones restantes.

Resultados de la evaluación del error absoluto. Si la validación cruzada constituye una suerte de autoevaluación interna, la evaluación del error absoluto, se puede considerar una evaluación externa, porque es en ella donde se valora qué tan bueno fue cada modelo de interpolación para reproducir las condiciones originales de la imagen utilizada en este estudio. Tal como

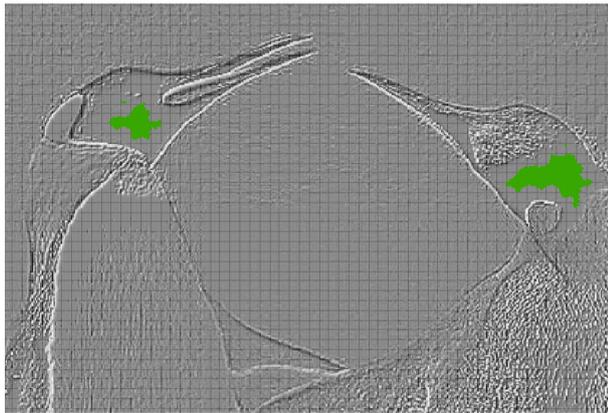
se refirió en el procedimiento metodológico, la evaluación del error absoluto consiste en el desarrollo de las matrices de errores que resulta de comparar píxel a píxel, los resultados de cada modelo de interpolación con la imagen original. Desde el punto de vista práctico, esta evaluación se realiza analizando el resultado de las matrices de errores desde dos perspectivas.

Cantidad de elementos cero en la matriz de errores: es decir, aquellos píxeles donde el modelo interpretó fielmente a la imagen original. La cantidad de valores cero en la matriz de errores es en consecuencia, una medida de la exactitud del modelo de interpolación utilizado.

Cantidad de píxeles similares: donde el error se ubica en un rango entre 10 y -10, es decir aquellos píxeles cuyo valor se asemeja mucho al valor original. Este criterio es importante, porque de alguna manera valora la flexibilidad de ajuste del modelo de interpolación, en la medida de que este grupo de píxeles sea grande, en esa misma medida el modelo de interpolación

se adapta a la imagen original, desde esta perspectiva se puede decir entonces que este criterio representa la precisión del proceso de interpolación.

La siguiente serie de figuras (figuras 7, 8, 9 y 10) muestra los resultados del análisis para la evaluación del error absoluto, basado en los criterios anteriormente señalados:

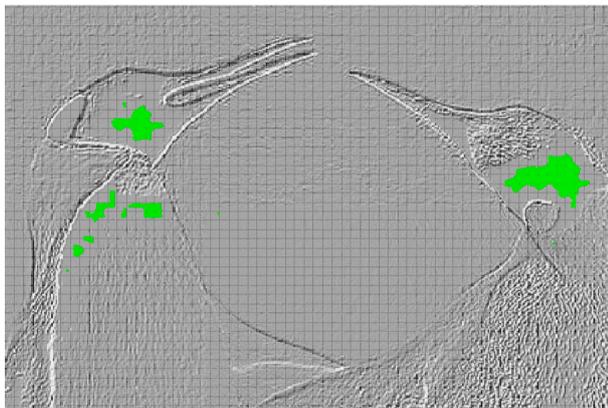


● Píxel cero ● Otro
Cantidad de píxeles cero:1268, 1,05%



● Píxel similar ● Píxel distinto
Cantidad de píxeles similares: 89619, 74,6%

Figura 7. Evaluación del error absoluto en el método DIP.



● Píxel cero ● Otro
Cantidad de píxeles cero:1559, 1,31%



● Píxel similar ● Píxel distinto
Cantidad de píxeles similares:90632, 75,44%

Figura 8. Evaluación del error absoluto en el método FPL.

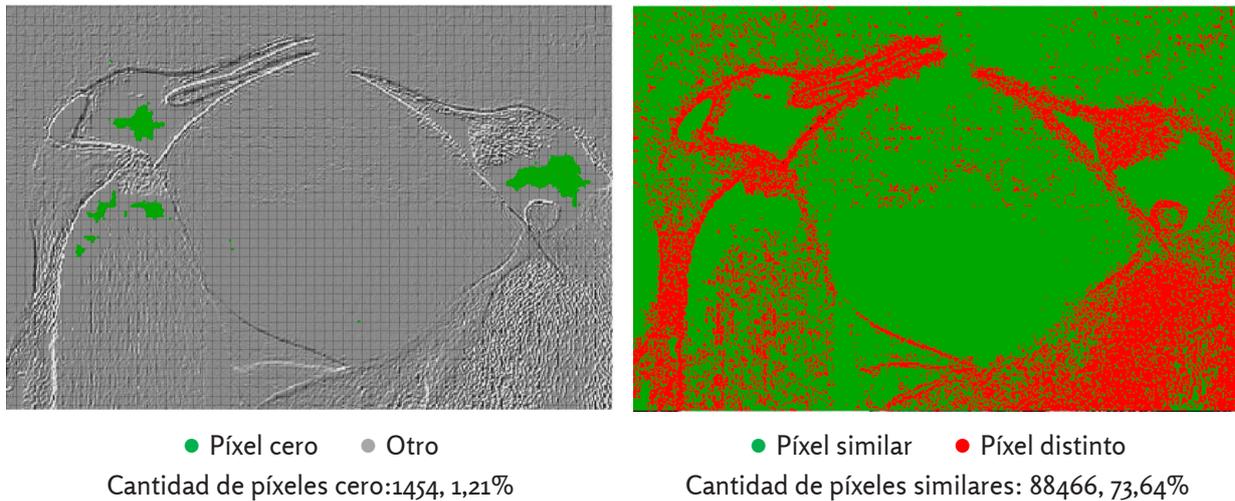


Figura 9. Evaluación del error absoluto en el método VRC.

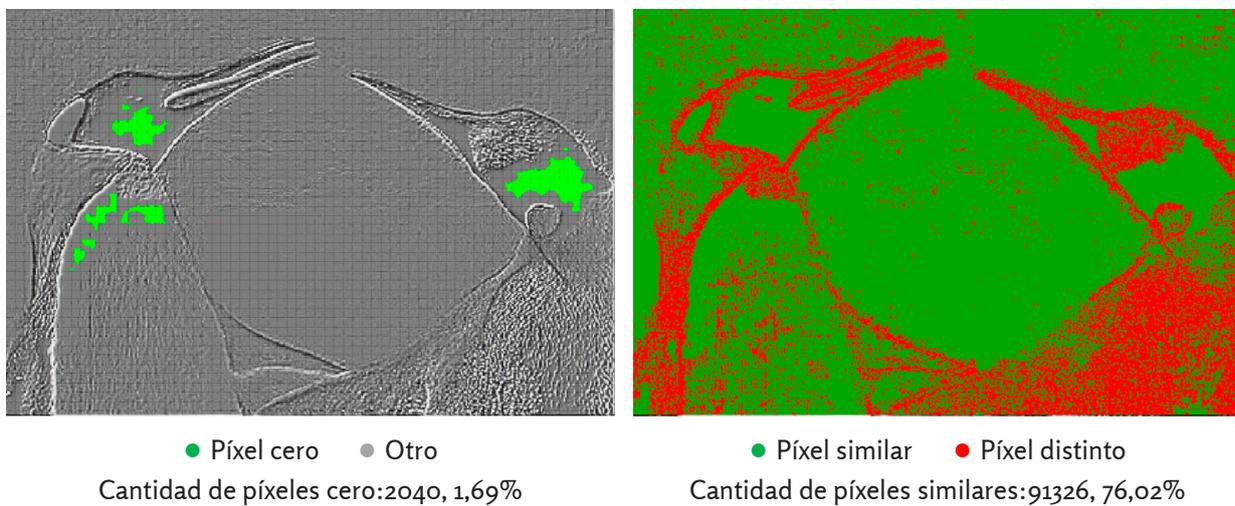


Figura 10. Evaluación del error absoluto en el método EKV.

Análisis comparativo de la evaluación del error absoluto. La tabla 2 muestra un resumen de los resultados de la evaluación del error absoluto efectuada a las cuatro estrategias de interpolación utilizadas en este estudio, presentando los valores de los parámetros de análisis en cada caso. Como

se aprecia en la tabla, los resultados fueron interesantes, pues para ambos parámetros de comparación, el método de interpolación basado en kriggin universal tuvo el mejor desempeño. Sin embargo, el segundo mejor método de interpolación fue el basado en función polinomial localizada (FLP). De

hecho, la diferencia entre el mejor y el segundo mejor resultado fue menor al 10 %, por lo que el predominio de kriggin según este criterio, no fue significativo en términos de representar una tendencia claramente dominante.

Tabla 2. Resumen de los resultados de la validación cruzada.

Método	Cantidad de píxeles cero	%	Cantidad de píxeles similares	%
DIP	1.286	1,05	89.619	77,60
FPL	1.559	1.31	90.632	75,54
SPLINE	1.454	1,21	88.466	73,64
KRIGGIN	2.040	1,69	91.326	76,02
Mejor estimador				
EKU			EKU	

Análisis integral de resultados. En general, si se consideran ambos resultados con la misma ponderación, pareciera ser que el método de interpolación basado en función polinomial localizada es el mejor estimador para definir la razón de variación espacial y las peculiaridades espaciales de la imagen de estudio. Así puede ser considerado la razón de realce espacial de esta imagen, a los efectos de mejorar su resolución espacial.

En este sentido, para comprobar el comportamiento de este modelo, se tomó el resultado de la aplicación del método de interpolación función polinomial localizada y con base en ello, se hizo un resampleo que supone un sub-escalamiento del 50 %, o sea, una mejora del 100 % de la resolución espacial original de la imagen de estudio. Se esperaba que tal procedimiento produjera una imagen mejorada, con

mucho más detalle y con una mejor calidad visual. Debe tenerse en cuenta que una vez establecida la función, el patrón de distribución domina la interpolación espacial en la imagen de estudio. En este caso, con una función polinomial localizada, era posible establecer cualquier razón de reescalamiento, siendo esta posibilidad un elemento cualidad adicional de este análisis. Para efectos ilustrativos, en este caso se ejecutó un resampleo del 50 %, solo por razones prácticas, pudiendo hacerse reescalamientos de mayor razón de variación. La imagen mostrada en la figura 11, ilustra los resultados de este procedimiento. Cuando se analiza a simple vista, la imagen original de estudio y la imagen realizada al 50 %, no se observan variaciones significativas, sin embargo, los cambios son perceptibles, a medida que se comienzan a apreciar las limitaciones de la imagen original de estudio, por efecto

de píxelado, es acá cuando es evidente la calidad del realce logrado, luego del

resamplado, basado en la manipulación geo-estadística de la imagen.



Figura 11. Imagen realzada (sub-escalamiento del 50 %).

La figura 12 es elocuente en este sentido, corresponde a un análisis visual de tres sectores de la imagen que presentan cualidades de alto contraste, morfología afinada y brillo. la figura corresponde al resumen de un análisis visual practicado en tres ventanas de acercamiento aproximado de 750 %. En este contexto, estas ventanas corresponden a los siguientes detalles:

Encuentro de los picos: los picos de los dos pingüinos se encuentran, uno cerrado y el otro levemente abierto. Esta ventana es un ejemplo de la presencia de elementos afinados (significativamente agudos respecto al resto de los elementos de la imagen). Este tipo de elementos son limitantes en la calidad visual de cualquier ráster, cuando se acerca al límite de su resolución espacial. Se esperaba que tras

el realce, la apariencia aguda permaneciera más allá de las limitaciones originales, tras un acercamiento significativo.

Cuello pingüino izquierdo: en este caso, la intención era visualizar el manejo del contraste, dado que en un entorno claro, parte del cuello es blanca y la otra parte es negra. Se esperaba que tras el acercamiento, el contraste permitiera diferenciar claramente los tres aspectos.

Lunar en el pingüino derecho: en este caso, se pretendía evaluar visualmente la calidad de los resultados, en términos de cuán fielmente destacan elementos resaltantes en un entorno oscuro.

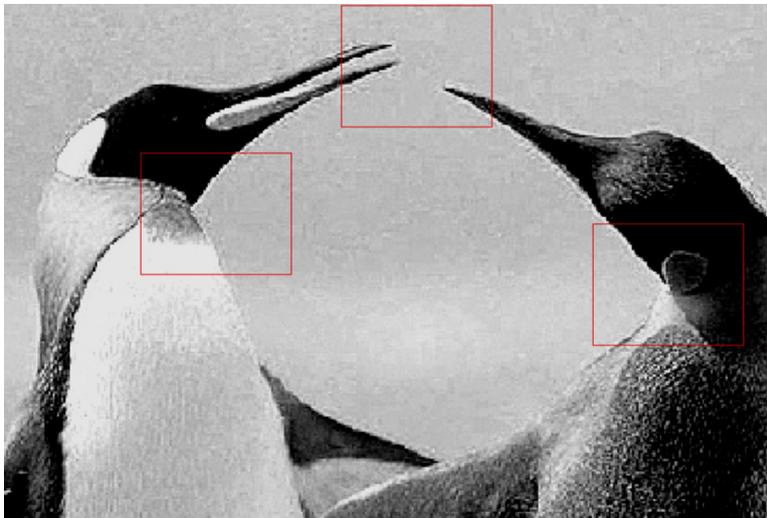
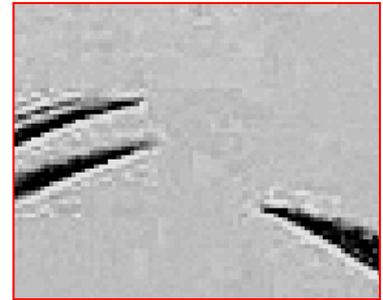


Imagen de estudio original



Encuentro de los picos
Imagen original

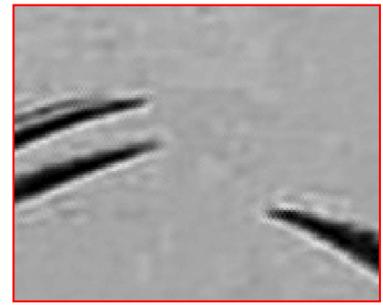
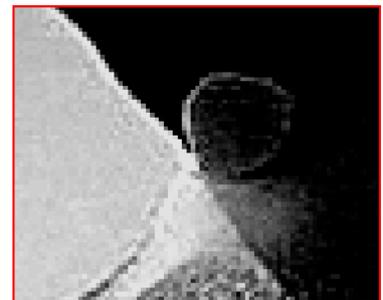


Imagen realzada



Lunar en pingüino
Imagen original

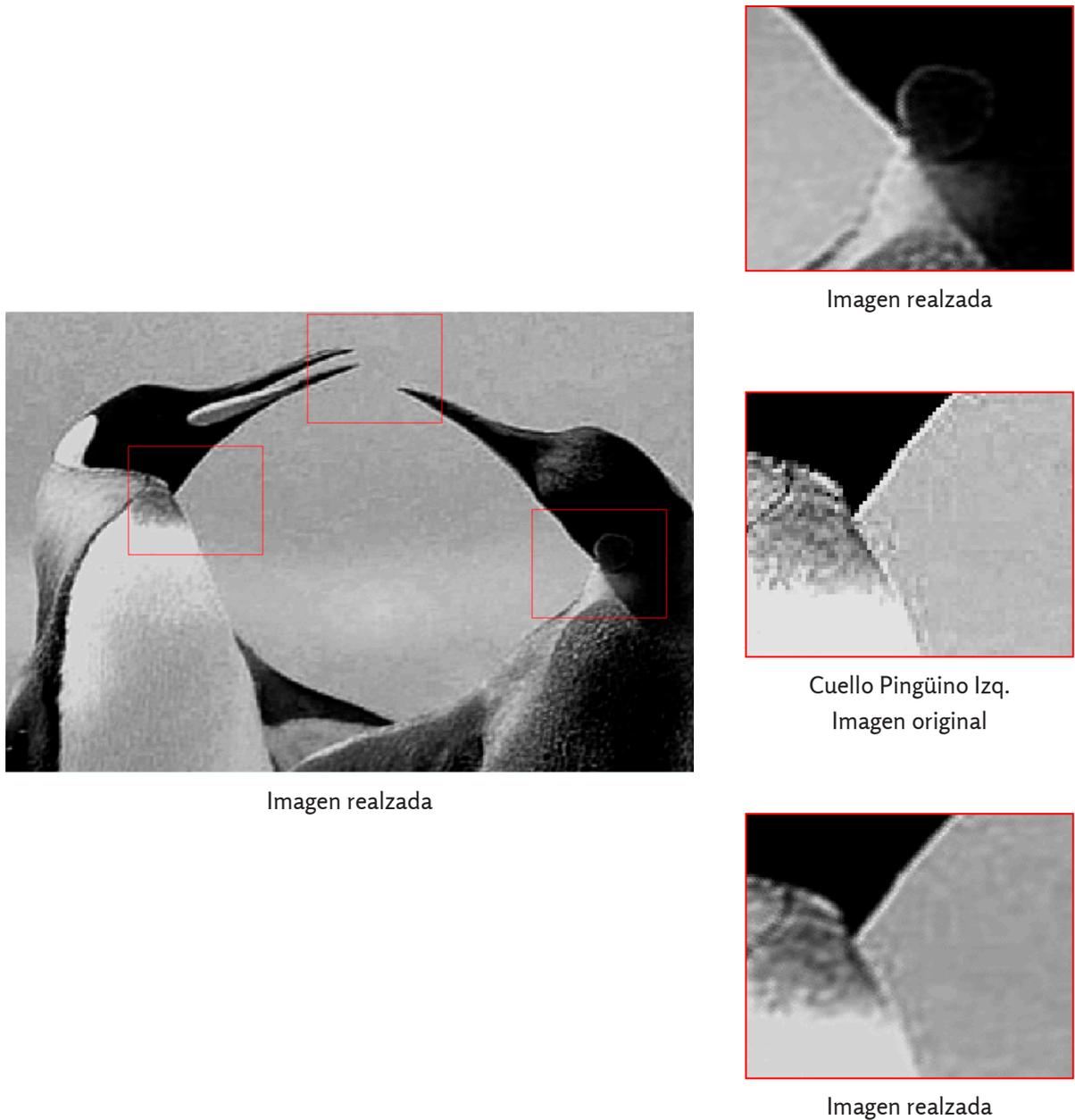


Figura 12. Análisis visual de la calidad del realce.

En el caso del sector que corresponde a encuentro de picos, se observa una significativa mejora en la calidad de detalles,

tras el acercamiento. En la imagen realzada, los picos se siguen distinguiendo como un elemento continuo de bordes lineales y

claramente definidos, mientras que en la imagen original, los bordes comienzan a verse aserrados, como consecuencia de las limitaciones de la resolución espacial de la imagen original.

En el caso del lunar en el pingüino derecho, en la imagen realzada se observa una buena definición de los bordes, pero se pierde mucho del brillo original, por lo que probablemente este tipo de procedimientos no resulta muy satisfactorio para estos casos.

Por otra parte, en el caso del cuello del pingüino derecho, se observa una mejora significativa en la imagen realzada, respecto a la imagen original, además hay una mejor y más coherente definición de los bordes y menos ruido alrededor de ellos.

Conclusiones

Luego de finalizar este estudio con un análisis sobre la calidad visual de la imagen, se puede decir que los resultados son satisfactorios a los efectos del planteamiento de la hipótesis original. De este modo, si es factible que un análisis comparativo y sistemático de distintas opciones de interpolación espacial posibilite un realce significativo en la calidad visual de imágenes digitales ordinarias.

Como se demostró, una vez establecido el patrón de distribución espacial propio de la imagen, en teoría, el proceso de reescalamiento no está limitado; por lo que se podrían obtener imágenes aún

más detalladas que las consideradas en este experimento. Sin embargo, en la práctica existe un umbral de funcionalidad de este tipo de procedimiento que depende de las características propias de cada imagen, la cantidad de detalles que se pretenden realzar y de las capacidades computacionales del *hardware* implementado en el análisis. La determinación efectiva de este umbral práctico escapa del alcance establecido para este estudio, sin embargo, se están adelantando futuras investigaciones al respecto, que se basan en la razón de cambio tras sub-escalamientos sucesivos.

El tratamiento de imágenes a color es un tema todavía en desarrollo que será tratado en futuras publicaciones, sobre todo por nulo efecto de este factor en la interpolación espacial. Desde este punto de vista, es necesario recalcar que los avances obtenidos hasta ahora, consideran solo imágenes pancromáticas.

Cabe destacar que este procedimiento de realce es un mejoramiento sistemático, basado en la potencialidad de distintos estimadores espaciales, por lo que es independiente de la validación basada en observaciones más detalladas de la misma escena, desde este aspecto, el resultado constituye una mejor estimación, más que una nueva realidad mejor observada.

Referencias Bibliográficas

Bravo De Guenni, L. (2009). *Apuntes de estadísticas ambientales*. Caracas,

- Venezuela: Universidad Simón Bolívar.
- Burrough, P. (1983). Multiscale source of spatial variation in soil. I. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation. *Journal of Soil Science*, 34, 577-597.
- Escuela Superior Politécnica del Litoral. (2004). Trabajo de Grado. Capítulo 2. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/13277/9/CAPITULO%202F.pdf>
- González, J., Guerra, F., & Gómez, H. (2007). Conceptos básicos de geo-estadística en geografía y ciencias de la tierra: Manejo y Aplicación. *Geo-enseñanza*, 12 (1), 81-90.
- Journel, A.G. & Huijbregts, C.J. (1978). *Mining Geo-statistics*. New York: Academic Press.
- Melo, C.E. (2012). *Análisis geo-estadístico espacio tiempo basado en Distacias y Splines con aplicaciones*. Universidad de Barcelona.
- Rodríguez, J.A. (1999). El Concepto geo-estadístico de variable regionalizada. *Terra Nueva Etapa*, 15 (24), 141-148.
- Silván, J.L. & López, P. *Geo-cibernética. Clasificación subpíxel desde una perspectiva ontológica*.
- Viloria, J. (2012). *Análisis Geoestadístico e interpolación Espacial*. Caracas, Venezuela: Fundación Instituto de Ingeniería.