



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Evaluación de Modelos Digitales de Elevación usando datos LiDAR e imágenes satelitales.

TRABAJO DE TITULACIÓN.

AUTOR: Cango Mena, Lauro Patricio.

DIRECTOR: González Jaramillo, Víctor Hugo. Ing.

CO DIRECTOR: Fries, Andreas Erwin. Ph. D.

LOJA - ECUADOR

2017

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.

Ingeniero.

Víctor Hugo González Jaramillo.

Ph. D.

Andreas Erwin Fries.

DOCENTES DE LA TITULACIÓN.

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: “**Evaluación de Modelos Digitales de Elevación usando datos LiDAR e imágenes satelitales**”, realizado por *Lauro Patricio Cango Mena*, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, Septiembre del 2017

f)

f)

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.

“Lauro Patricio Cango Mena, declaro ser autor del presente trabajo de titulación: *Evaluación de Modelos Digitales de Elevación usando datos LiDAR e imágenes satelitales*, de la Titulación de Ingeniería Civil; siendo el Ing. Víctor Hugo González Jaramillo Director y el Ph.D. Andreas Erwin Fries Co-Director del presente trabajo. Eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja, que en su parte pertinente textualmente dice: Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.

f.

Autor: Lauro Patricio Cango Mena.

Cédula: 1104344088.

DEDICATORIA:

El presente trabajo de investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, lo dedico de manera especial a Dios por darme la vida, haberme guiado y permitido cumplir con mis objetivos; a mis queridos padres Marta y Lauro por apoyarme a cristalizar mis sueños.

El Autor

AGRADECIMIENTO:

A Dios, por darme la oportunidad de concluir mi formación profesional.

Además, dejo constancia de mi gratitud a la Universidad Técnica Particular de Loja, a la Titulación de Ingeniería Civil, a sus dignas Autoridades, a los Docentes. De manera especial mi profundo agradecimiento al Ing. Víctor Hugo González y al PhD. Andreas Fries, Director y Co Director de mi Tesis; quienes me han orientado con sus acertadas correcciones y sugerencias para culminar con éxito.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	II
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	V
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	5
1.1. Teledetección.	6
1.1.1. Antecedentes.....	6
1.1.2. Generalidades de la Teledetección.....	8
1.1.3. Fundamentos físicos.....	10
1.1.4. Sensores.	14
1.1.5. Plataformas de la Teledetección.....	15
1.2. LiDAR.....	17
1.2.1. Generalidades.	17
1.2.2. Funcionamiento	17
1.2.3. Componentes.	20
1.2.4. Fuentes de error.	21
1.2.5. Ventajas y desventajas.....	22
1.2.6. Aplicaciones	23
1.3. Modelos Digitales de Elevación (MDE).....	25
1.3.1. Modelos Digitales de Terreno.	25
1.3.2. Modelos Digitales de Superficie.....	26

1.3.3.	Tipos de datos	27
1.3.4.	Fuentes de datos de elevación	28
1.3.5.	MDE globales disponibles gratuitamente	28
1.4.	La cuenca hidrográfica y sus características morfométricas	33
1.4.1.	Parámetros generales	34
1.4.2.	Parámetros de forma	35
1.4.3.	Parámetros de drenaje	38
1.4.4.	Parámetros de relieve.....	40
1.5.	Geometría Fractal.....	42
1.5.1.	Antecedentes.....	42
1.5.2.	Introducción al concepto fractal	43
1.5.3.	Características de los objetos fractales.....	44
1.5.4.	Dimensión fractal.....	44
1.5.5.	Clasificación de los fractales.....	46
1.5.6.	Métodos de cálculo y algoritmos fractales	47
1.5.7.	Introducción al concepto multifractal.....	50
1.5.8.	Algoritmos Multifractales.....	50
1.5.9.	Aplicaciones de la geometría fractal en la ciencia y la tecnología.....	53
CAPÍTULO II: DATOS Y MATERIALES.....		55
2.1.	Área de estudio	56
2.2.	Obtención y características de los datos.....	60
2.3.	Software	61
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....		63
3.1.	Procesamiento de los datos LiDAR	64
3.1.1.	Generación de los MDT mediante FUSION	69
3.2.	Pre-procesamiento de los MDE satelitales.	73
3.3.	Procesamiento de los MDE corregidos	74
3.4.	Delimitación de la cuenca hidrográfica.....	75
3.5.	Análisis estadístico de los MDE	79

3.6. Análisis Multifractal Sand-box.....	80
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	82
4.1. Procesamiento de los datos LiDAR	83
4.2. Procesamiento de los MDE a partir de fuentes satelitales	85
4.2.1. Obtención de los datos.....	85
4.2.2. Pre-procesamiento	87
4.2.3. Procesamiento.....	87
4.3. Delimitación de la cuenca hidrográfica.....	88
4.3.1. Parámetros morfométricos de la cuenca hidrográfica	88
4.4. Análisis estadístico de los MDE	100
4.5. Distribución espacial de las redes e inspección visual	101
4.6. Análisis Multifractal Sand-box.....	108
FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	116
CONCLUSIONES.....	117
RECOMENDACIONES.....	120
BIBLIOGRAFÍA.....	121
ANEXOS	141

ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1. Satélites/Sensores de observación terrestre en la última década.....	7
Tabla 2. Clasificación de las cuencas hidrográficas.	34
Tabla 3. Clasificación de las cuencas hidrográficas en función al tamaño.	34
Tabla 4. Valores interpretativos del factor forma.	36
Tabla 5. Valores interpretativos del coeficiente de compacidad de Gravelius.	37
Tabla 6. Valores interpretativos de la densidad de drenaje.	39
Tabla 7. Clasificación de la pendiente en las cuencas hidrográficas.	41
Tabla 8. Comparación de las geometrías: Euclidiana y Fractal.....	43
Tabla 9. Resumen de los MDE satelitales utilizados.	61
Tabla 10. Clasificación de puntos LiDAR	65
Tabla 11. Resumen: Filtros de puntos LiDAR basados en superficies	66
Tabla 12. Resumen: Filtros morfológicos de puntos LiDAR	67
Tabla 13. Tamaño del píxel re muestreado.....	75
Tabla 14. Características principales de los MDE.	86
Tabla 15. MDE adecuado para cada resolución y parámetro morfométrico.	99
Tabla 16. Resumen estadístico de los MDE de fuentes satelitales.	100
Tabla 17. Error Cuadrático Medio.	112
Tabla 18. Parámetros multifractales del área de estudio.....	114
Tabla 19. MDE adecuado para cada resolución en los parámetros analizados.....	115

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1. Sistema visual del ojo humano.....	9
Figura 2. Elementos de la Teledetección.	10
Figura 3. Espectro electromagnético.....	12
Figura 4. Interacción Radiación – Energía.	13
Figura 5. Plataformas de teledetección.....	15
Figura 6. Geometrías de escaneo.....	17
Figura 7. MDT.....	26
Figura 8. MDS.....	27
Figura 9. Satélite TERRA, Dirección de vuelo: hacia atrás & NADIR.	29
Figura 10. Misión SRTM.	31
Figura 11. Satélite ALOS.	32
Figura 12. Precipitación en una cuenca hidrográfica.....	33
Figura 13. Representación de las dimensiones enteras y fraccionarias.	45
Figura 14. Dimensión fractal.	45
Figura 15. Dimensión fractal de la Curva de Von Koch.	46
Figura 16. Diagrama y estimación de la dimensión fractal – Método Box Counting. ...	48
Figura 17. Imagen de Intensidad – Método Box Counting Diferencial.	49
Figura 18. Método de movimiento Browniano.	50
Figura 19. Multifractal Sand-box.	52
Figura 20. Método Wavelet.....	53
Figura 21. Área de estudio.....	56
Figura 22. Topografía del área de estudio.	57
Figura 23. Cordillera Oriental de los Andes y área de estudio.....	58
Figura 24. Vegetación del área de estudio.....	59
Figura 25. Sistema Hidrográfico del Río Santiago.....	60
Figura 26. Estadísticas focales.	73
Figura 27. Procesamiento de los MDE.....	74
Figura 28. Proceso de corrección de errores en sumideros o picos.	76
Figura 29. Proceso de dirección de flujo.	76
Figura 30. Proceso de acumulación de flujo.	77
Figura 31. Proceso de extracción de una cuenca hidrográfica a partir de un MDE.	79
Figura 32. Densidad Nominal de retornos, resultado del comando Catalog.	83
Figura 33. Eliminación de (outliers), resultado del comando Filterdata.	84

Figura 34. Densidad nominal de retornos - resultado luego de aplicar los comandos Catalog y Groundfilter (eliminación de outliers).....	84
Figura 35. Remuestreo del MDT a diferentes tamaños de píxel (12.5, 30, 50, 75) m. .	85
Figura 36. Interfaz gráfica del visor de descargas de Earth Explorer.	85
Figura 37. Interfaz gráfica del visor de descargas de Alaska Satellite Facility's.	86
Figura 38. Relleno de zonas sin datos dentro de un MDE (Pre-procesamiento).	87
Figura 39. Remuestreo de un MDE a resoluciones de 30 m, 50 m, 75 m.....	88
Figura 40. Parámetros Morfométricos - Área (Resolución 12.5 m).....	89
Figura 41. Parámetros Morfométricos - Área (Resolución 30 m).....	90
Figura 42. Parámetros Morfométricos - Área (Resolución 50 m).....	90
Figura 43. Parámetros Morfométricos - Área (Resolución 75 m).....	91
Figura 44. Representación del área en diferentes resoluciones.....	92
Figura 45. Parámetros Morfométricos – Perímetro (Resolución 12.5 m).....	92
Figura 46. Parámetros Morfométricos – Perímetro (Resolución 30 m).....	93
Figura 47. Parámetros Morfométricos – Perímetro (Resolución 50 m).....	93
Figura 48. Parámetros Morfométricos – Perímetro (Resolución 75 m).....	94
Figura 49. Representación del perímetro a diferentes resoluciones.....	94
Figura 50. Longitud total de cauces.	95
Figura 51. Longitud y orden de drenaje.....	96
Figura 52. Distribución del orden hídrico en la cuenca hidrográfica.	97
Figura 53. Pendiente media de la cuenca hidrográfica.....	98
Figura 54. Pendiente media del cauce principal.....	99
Figura 55. Comparación visual de las redes de drenaje (Zonas).	102
Figura 56. Comparación visual de las redes de drenaje (12.5 m).	103
Figura 57. Comparación visual de las redes de drenaje (30 m).	104
Figura 58. Comparación visual de las redes de drenaje (50 m).	105
Figura 59. Comparación visual de las redes de drenaje (75 m).	106
Figura 60. Correlación entre las redes de drenaje (30 m).....	107
Figura 61. Correlación entre las redes de drenaje (50 m).....	107
Figura 62. Correlación entre las redes de drenaje (75 m).....	108
Figura 63. Curvas de escala.	111
Figura 64. Error Cuadrático Medio.....	112
Figura 65. Espectro de Renyi.....	113

RESUMEN.

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) son necesarios para desarrollar proyectos relacionados con la Ingeniería Civil y administración de recursos naturales, sin embargo, la disponibilidad de los MDE en alta resolución es limitada. El presente trabajo de investigación evalúa la idoneidad de los MDE obtenidos de diferentes fuentes de datos satelitales globales. Además, se comparan estos modelos con productos similares de alta resolución que se han generado a partir de un novedoso sistema de obtención de información terrestre, específicamente del sensor LiDAR (Light Detection And Ranging).

Como parámetros de evaluación de los MDE, se seleccionó las características morfométricas de la cuenca hidrográfica del Río San Francisco, ubicado al sur del Ecuador, entre las provincias de Loja y Zamora. De estas características se derivan adicionalmente atributos de interés para el estudio hidrológico como las redes de drenaje. Usando la geometría fractal, que es una ciencia relativamente nueva, se realiza el análisis con el método Multifractal Sand-box para determinar la calidad de las redes generadas y establecer cuál sería la mejor resolución espacial para usarse en trabajos relacionados con la Ingeniería Civil.

Palabras clave: LiDAR, MDE, datos satelitales, Análisis Multifractal Sand-box, Cuenca Hidrográfica.

ABSTRACT.

Digital Elevation Models (DEM), are necessary to develop projects related to civil engineer and natural resource management. However, their availability in high resolution is limited, for which reason the present research work evaluates the suitability of different sources where a DEM can be obtained (e.g. global satellites). Furthermore, a comparison of these models is performed using similar products of high resolution, which was generated using the relative new system LiDAR (Light Detection And Ranging).

As evaluation parameters for the different DEM, it was selected the morphometric characteristics of a watershed located in southern Ecuador, between Loja and Zamora provinces. From these characteristics, additionally attributes for hydrological analysis are derivate, such as the drainage networks. Using the so called fractal geometry, it was performed the analysis using the Multifractal Sand-box method to assess the quality of the generated geometric networks and to determine a suitable resolution that can be used in applications such as civil engineer and natural resource management.

KEY WORDS: LiDAR, DEM, Satellite data, Multifractal Method Sand-box, River Basin.

INTRODUCCIÓN

En trabajos relacionados con el uso y manejo de los recursos naturales, es necesario analizar factores relacionados a la topografía, además para: determinar los parámetros de modelación hidrológica, la delimitación de cuencas hidrográficas, los usos del suelo, la planificación, gestión y administración del territorio (Hudak, Evans, y Smith, 2009; Li y Wong, 2010). Sin embargo, la calidad de estos parámetros dependen de las características del terreno y del tipo de procesamiento de datos (Bakua, Dominik, y Ostrowski, 2014). La información del terreno está facilitada en forma de Modelos Digitales de Elevación (MDE), los mismos que son una representación numérica de la superficie terrestre dada por las coordenadas [X,Y,Z] en diferentes resoluciones espaciales, obtenidos principalmente de sensores remotos (Papasaika-Hanusch, 2012).

Los MDE de alta resolución espacial son necesarios para varios tipos de investigaciones, pero, en zonas remotas o de acceso limitado, son difíciles de obtener debido a la escasez y calidad de la información (Purinton y Bookhagen, 2017; Sala, Matko, y Falk, 2014). Generalmente, se trabaja con datos de baja resolución espacial que son proporcionados por diversos sensores satelitales. Existe información gratuita de la Misión Topográfica Radar Shuttle (SRTM), el Radiómetro Espacial Avanzado de Emisión y Reflexión Térmica (ASTER) y del satélite ALOS el sensor PALSAR (Jarihani, Callow, McVicar, Niel, y Larsen, 2015). Sin embargo, los MDE satelitales aparte de su baja resolución espacial pueden presentar errores debido a: las características del sensor, el modo de obtención de datos, aspectos ambientales y procesamiento de la información. Para obtener información válida es necesario corregir primero los sectores del MDE que no contienen datos; causados por nubosidad, topografía etc. (Yue et al., 2017).

La corrección se puede realizar a través de estadísticas focalizadas (interpolación) que permiten rellenar los vacíos con datos de las celdas vecinas que contienen información (p.ej. SRTM). Sin embargo, el relleno es solo una estimación (Baugh, Bates, Schumann, y Trigg, 2013; Jarihani et al., 2015). Otros MDE derivados de productos de ASTER y ALOS PALSAR, contienen información completa de la zona de estudio, pero muchas veces la resolución no es suficiente para estudios relacionados con el uso y manejo de los recursos naturales.

Debido a la necesidad de generar MDE de alta precisión y resolución, se implementaron nuevas tecnologías que permitan un levantamiento rápido y directo de grandes áreas con sensores remotos (Van der Sande, Soudarissanane, y Khoshelham, 2010; Wulder et al., 2012). Algunos de estos métodos de teledetección son: Interferometría por sensores

satelitales, fotogrametría aérea y Light Detection and Ranging (LiDAR) (Mukherjee et al., 2012; Shean et al., 2016).

LiDAR, también conocido como Escáner Láser Aerotransportado, es un sensor activo que emite un flujo de partículas de alta energía hacia una superficie sólida reflectante (suelo desnudo, roca, pavimento, edificios, etc.) (Canada, 2010). La medición se realiza a partir de la diferencia de tiempo entre la emisión de un pulso de láser y la recepción de reflexión del pulso, denominado retorno (Heideman, 2014). Cada retorno se convierte en una distancia, que permite determinar la ubicación del objeto reflejado en 3D, la que es verificada con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) (De Gloria et al., 2014; Dewberry, 2012).

En las mediciones del barrido láser aerotransportado, también se presentan errores de origen sistemáticos o aleatorios, debido a: los mecanismos de exploración, los sensores de navegación y las propiedades de la superficie (geometría, reflectancia) (Van der Sande et al., 2010). Para corregir estos errores se aplica diversas técnicas de filtrado, que permiten la generación de MDE de alta precisión (Ullrich et al., 2007). Estos MDE son más detallados y precisos que los obtenidos por métodos tradicionales (satelitales), porque permiten eliminar los objetos sobre la superficie (vegetación, edificios etc.) lo que es valioso en el análisis de cuencas hidrográficas (Papasaika-Hanusch, 2012). Las características morfométricas de la cuenca hidrográfica que se analizan, incluyen la delimitación de la cuenca y la generación de las redes fluviales; la exactitud de estas características depende principalmente de la precisión del MDE (Martínez-Martínez & Campos-Aranda, 2010; Sanzana et al., 2017)

Para determinar la precisión de los MDE generados a distintas escalas se utiliza la teoría multifractal afín de establecer una resolución adecuada (Ariza-Villaverde, Jiménez-Hornero, y Gutiérrez de Ravé, 2013). Esto permite analizar la calidad y precisión de la información del terreno a través de las redes fluviales generadas con la aplicación del método Sand-box (S. De Bartolo, Gaudio, y Gabriele, 2004). Este método genera una construcción completa del espectro multifractal, eliminando los problemas de efecto de borde en zonas con pocos datos y momentos negativos (S. G. De Bartolo & Gabriele, 2004).

El presente trabajo de fin de carrera está dividido en cuatro capítulos: el primero se basa en los fundamentos teóricos de la teledetección, MDE, tecnología LiDAR, parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica y la geometría fractal; el segundo describe el área de estudio, datos y materiales utilizados; el tercero explica la metodología aplicada; el cuarto presenta los resultados y discusión del trabajo; finalmente las conclusiones, recomendaciones y futuras líneas de investigación.

CAPÍTULO I
MARCO TEÓRICO

1.1. Teledetección.

1.1.1. Antecedentes.

Con la ayuda de los primeros instrumentos de trasportación aérea, en 1859 un fotógrafo llamado Gaspar Felix de Tournachon logró capturar las primeras fotografías aéreas; en 1860 James Wallace repitió la experiencia sobre la ciudad de Boston (Gorokhov, 2009). En 1909, Wilbur Wright desde un avión obtuvo la primera fotografía aérea, dejando al descubierto el interés por obtener información de la Tierra (Fujii y Fukuchi, 2013).

El primer dispositivo con características similares a los sensores de Teledetección, fue desarrollado en 1904 por Christian Huelsmeyer en Düsseldorf, Alemania, denominado "telemobiloscope" (Gorokhov, 2009). Era un sistema emisor – receptor que por medio de ondas eléctricas capturó información de objetos metálicos distantes en una dirección. En 1935, un grupo de científicos del laboratorio Naval de los Estados Unidos probaron un radar con pulsos de 60 MHz para detectar aviones, pero los pulsos del transmisor causaban mucho ruido, saturando las señales que regresan de objetos cercanos (Garcia y Ruiz, 2014). A finales de 1938 desarrollaron un sensor de 200 MHz que detectó aviones hasta 100 kilómetros de distancia (Gorokhov, 2009; Malachowski y Zmija, 2010).

Durante la segunda guerra mundial, los actores principales tenían la necesidad de comunicarse desde puntos lejanos y obtener información del enemigo (Fujii y Fukuchi, 2013). Eso impulsó el desarrollo de la fotografía con mejoras en los procesos de adquisición de información a través de diferentes sensores. Tras varios estudios de la atmósfera terrestre con globos y cohetes, el 4 de Octubre de 1957 la Unión Soviética lanzó al espacio el primer satélite del mundo llamado Sputnik 1 (CIMSS, 2004). El satélite emitió por radio unos sonidos de su órbita que demostraron el éxito de la tecnología (CIMSS, 2004). Desde ese momento, la Teledetección empezó a ser un potencial de investigación a nivel mundial, y diferentes naciones enviaron satélites al espacio que fueron capaces de obtener imágenes de la Tierra. En la actualidad hay miles, de satélites de observación terrestre en órbita; los más importantes de la última década, se resumen a continuación (Tabla 1):

Tabla 1. Satélites/Sensores de observación terrestre en la última década.

PRODUCTO	SENSOR, SATÉLITE
Elevación	SRTM PALSAR I, II, ALOS ASTER, Terra TerraSAR-X – TanDEM-X
Precipitación	Imager, GOES series MVIRI, Meteosat 7/5 VISSR, GMS TML, TRMM SSM/I, DMSO series AMSR-E, Aqua MSU-B, NOAA series
Multiespectral, VNIR reflectancia/radiancia	AVHRR, POES series MODIS, Aqua/Terra ASTER, Terra AL1, EO - 1 Landsat Series, y LDCM SPOT GeoEye -1 Ikonos Quick Bird Worldview – 1 & 2 Formosat Sentinel 1, 2 WORLDVIEW - 3
Hiperespectral VNIR reflectancia/radiancia	Hyperion, EO-1
Incendios y anomalías térmicas	MODIS, Aqua/Terra
Áreas quemadas	MODIS, Aqua/Terra
Temperatura superficial	Landsat, Termal Infrared (TIR)
Cobertura terrestre y de bosque	MODIS, Aqua/Terra MERIS, Envisat Landsat series ASTER, Terra SPOT

	L-Band SAR (PALSAR), ALOS
Humedad relativa	AIRS and AMSU, Aqua
Imágenes de Radares De Apertura Sintética (SAR)	Banda C (SAR), Radarsat-1 y 2 Banda C (SAR), ERS-2 Banda L (SAR), PALSAR, ALOS
Batimetría y cuerpos de agua	SRTM30+
Movimientos de nubes en tiempo real	Imagery, GOES series

Fuente: (Labrador, Évora, y Arbelo, 2012; NASA, 2015)

Elaboración: El Autor.

Los intentos por medir los perfiles de densidad del aire en la atmósfera mediante la determinación de la intensidad de dispersión de haces de luz, dieron paso al inicio del desarrollo de la tecnología LiDAR que se remontó al año 1930 (Wandinger, 2012). En el año 1938, se utilizó pulsos de luz para medir la altura de la base de las nubes, debido al conocimiento la velocidad de la luz, se pudo medir el tiempo de ida y vuelta entre la emisión del pulso y la señal de detección (Tobergte y Curtis, 2013b). El acrónimo de LiDAR fue introducido por primera vez por Middleton y Spilhaus en 1953, que comenzó con la invención del láser en 1960 (Fujii y Fukuchi, 2013). Fiocco y Smullin publicaron las observaciones atmosféricas con un láser en 1963 (Wandinger, 2012). Aproximadamente una década más tarde todas las técnicas básicas LiDAR habían surgido. En consecuencia, el primer libro sobre LiDAR escrito por E. D. Hinkley apareció en 1976 (Fujii y Fukuchi, 2013). Desde entonces, el éxito en el desarrollo de LiDAR estaba relacionado con los avances en tecnología óptica y electrónica (Spring, 2011).

1.1.2. Generalidades de la Teledetección.

El procesamiento de la percepción sensorial de objetos a una distancia determinada es una capacidad que los seres humanos desarrollan. El hombre utiliza la iluminación de fuentes artificiales o naturales (p.ej. el Sol) para la detección óptica de objetos de los cuales reflejan o dispersan la luz que cae sobre ellos (Fujii y Fukuchi, 2013). Parte de esa luz es interceptada por los ojos y en la retina se forma una imagen que va a través de las fibras nerviosas al cerebro para que sean procesadas e interpretadas (Wandinger, 2012). Por construcción mental, el cerebro relaciona las diferentes partes de la escena y determina la ubicación de los objetos (Fig. 1).

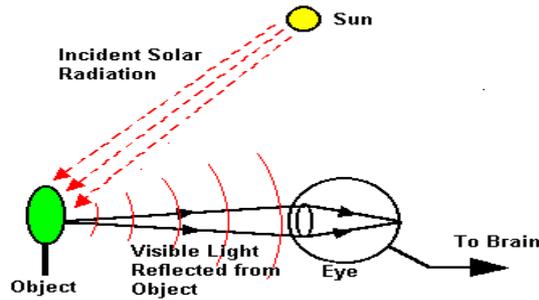


Figura 1. Sistema visual del ojo humano.

Fuente: <https://goo.gl/G8Ymsb> (2017)

Elaboración: El Autor.

Los sistemas de teledetección se basan en el mismo principio de la visión humana, donde la distancia se puede medir de manera cuantitativa en función al tiempo que transcurre desde la iluminación de una fuente hacia los objetos y su retorno. Según Chuvieco (2010) y las Naciones Unidas (2002), la Teledetección es una técnica que permite obtener información detallada de la superficie terrestre para analizar el estado de los recursos naturales, usos del suelo y protección del ambiente, a partir de sensores montados sobre una plataforma espacial, cuya interacción energética puede ser por reflexión de energía solar u ondas electromagnéticas.

Los sistemas de teledetección constan de los siguientes elementos (Arbelo, 2012; Chuvieco, 2016; Fig. 2):

- Fuente de energía o iluminación: provee energía electromagnética al objeto de interés.
- Atmósfera: permite que la energía viaje desde el sensor al objeto, interactuando con este elemento.
- Superficie terrestre u objetos: cuerpos que reciben energía y dependiendo de sus propiedades la reflejan.
- Sensor remoto y plataforma: capta y almacena la energía reflejada o emitida por el objeto y la atmósfera.
- Sistema de recepción - comercialización: estación receptora que recibe información transmitida por la plataforma, donde los datos se procesan y son convertidos un formato apropiado.
- Interpretación y análisis: extrae la información en la que los objetos fueron enfocados.
- Usuario final: revela información para resolver un problema particular a partir de los objetos de interés.

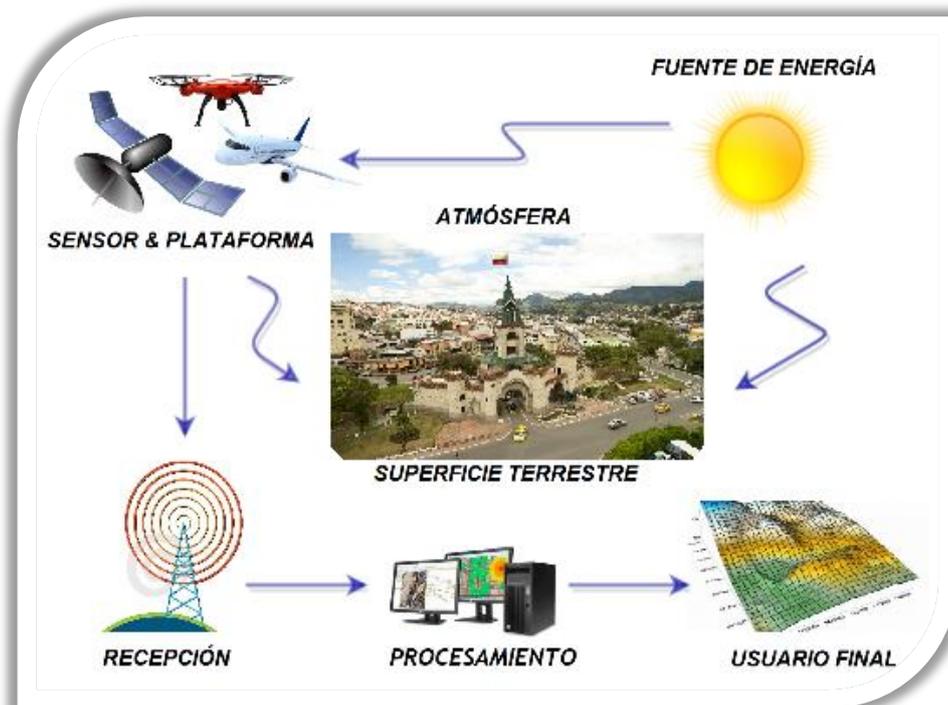


Figura 2. Elementos de la Teledetección.
Fuente/Elaboración: El Autor.

1.1.3. Fundamentos físicos.

Un sensor remoto es un instrumento que puede obtener información a partir de la energía de radiación electromagnética, mediante tres formas: emisión, reflexión y emisión-reflexión (González, Marcello, y Marqués, 2007). En cualquiera de estas formas, hay flujo de energía entre el objeto (P. ej. Tierra) y el sensor (Chuvienco, 2016). La energía se transfiere de un lugar a otro por procesos de radiación. La teoría de la radiación electromagnética se puede dividir en dos conceptos:

Maxwell y Huggens, definen a la luz como un movimiento ondulatorio descrito por dos elementos: longitud de onda y frecuencia que son inversamente proporcionales, mientras que Plank, Einstein y Newton, consideran la luz como pequeñas partículas, denominadas fotones, que son emitidas por fuentes luminosas propagándose en línea recta y atravesando medios transparentes (Fujii y Fukuchi, 2013).

La energía electromagnética viaja a la velocidad de la luz, posee propiedades eléctricas y magnéticas. El flujo electromagnético se conforma principalmente de: longitud de onda que es la distancia entre los picos de ondas sucesivas, y frecuencia que es el número de ciclos que pasan por un punto en un tiempo determinado (Sarria, 2006). El espectro magnético es

el conjunto de ondas electromagnéticas, su longitud de onda o frecuencia se puede clasificar de mayor (p.ej. TV/Radio) a menor (p.ej. Rayos Gamma, X) (Chuvieco, 2016).

Las regiones espectrales que se utilizan para la observación remota de la Tierra, se dividen en las siguientes bandas (Chuvieco, 2016; F. E. González et al., 2007; Olaya, 2014) (Fig. 3):

Bandas de onda corta:

- Rayos Gamma. Producida por elementos radioactivos o procesos subatómicos, es un tipo de radiación ionizante capaz de penetrar profundamente en la materia, además puede causar graves daños en el núcleo de las células.
- Rayos X. (10 a 0,1 nm) Es invisible, capaz de atravesar cuerpos opacos. Onda con longitud de y posee de 50 a 5000 veces más que la frecuencia de la luz visible.
- Ultravioleta. (4 a 400 nm). El Sol es una fuente de emisión de rayos en esta frecuencia

Espectro visible: Radiación que pueden percibir nuestros ojos, se subdivide en tres bandas: azul (0.4 a 0.5 μm), verde (0.5 a 0.6 μm) y rojo (0.6 a 0.7 μm).

Bandas de onda larga:

- Infrarrojo cercano: (0.7 a 1,3 μm), Puede ser detectada con emulsiones especiales, permite discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio: (1.3 a 8 μm), Mezcla los procesos de reflexión de la luz solar y emisión de la superficie terrestre.
- Infrarrojo lejano o térmico: (8 a 14 μm), Detecta el calor de la cubierta terrestre.
- Micro-ondas: (1 mm a 25 cm), Energía transparente a la cubierta nubosa, también utilizada por sensores activos.
- TV/ Radio: (> 200 cm).

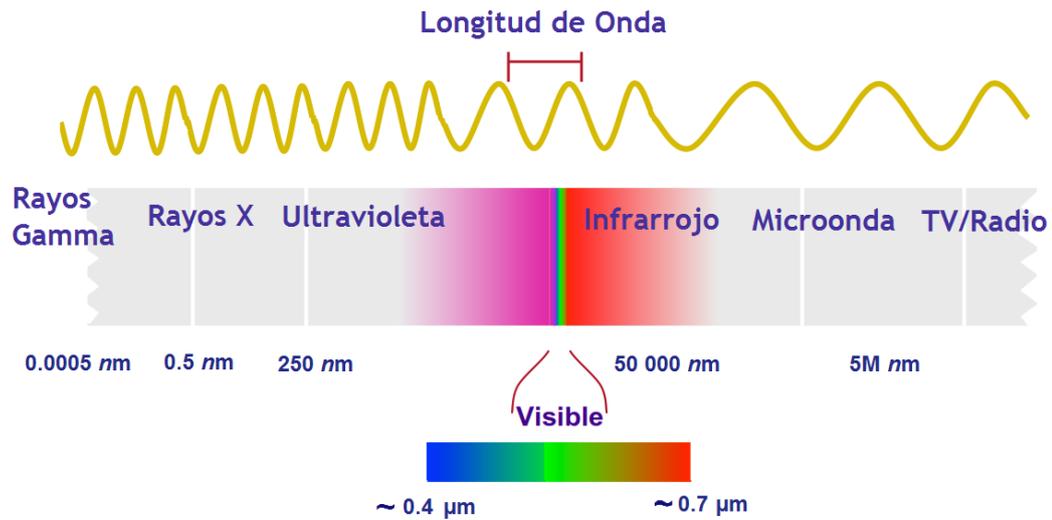


Figura 3. Espectro electromagnético.

Fuente: (NASA, 2015)

Elaboración: El Autor.

Los términos y magnitudes radiométricas son las siguientes, (Chuvienco, 2016):

- Energía radiante (Q): energía en todas las direcciones (Julios, J).
- Flujo radiante (ϕ): energía en todas las direcciones por unidad de tiempo (Vatios, W).
- Emitancia (M): energía en todas las direcciones, desde un área por unidad de tiempo (Wm^{-2})
- Irradiancia (E): energía emitida sobre un área por unidad de tiempo (Wm^{-2}).
- Intensidad radiante (I): energía emitida por unidad de tiempo y un ángulo que abarca un objeto visto desde un punto dado, conocido como ángulo sólido (Estéreo radián, Wsr^{-1}).
- Radiancia (L): energía emitida en determinada dirección por unidad de área y un ángulo sólido, describe lo que mide el sensor ($W/m^2 sr^{-1}$).
- Radiancia espectral (L_λ): energía emitida por determinada longitud de onda por unidad de área y ángulo sólido.
- Emisividad (ϵ): Relación de emitancia entre una superficie y la que ofrece un sensor (M_n).
- Reflectividad (ρ): Relación entre el flujo incidente y el que refleja una superficie.
- Absortividad (α): Relación entre el flujo incidente y el que absorbe una superficie
- Transmisividad (τ): Relación entre el flujo incidente y el que transmite una superficie.

Interacción de la radiación con la materia:

En función a las características de los objetos terrestres que reciben energía emitida por otros cuerpos (p. ej el Sol) (Olaya, 2014; Sarria, 2006), el flujo de la radiación se puede ver en la Figura 4, además se explica cómo radiación:

- Reflejada. La radiación regresa a la fuente.
- Absorbida. La radiación incrementa la energía del objeto.
- Transmitida o difundida. La radiación se transfiere hacia otros objetos.

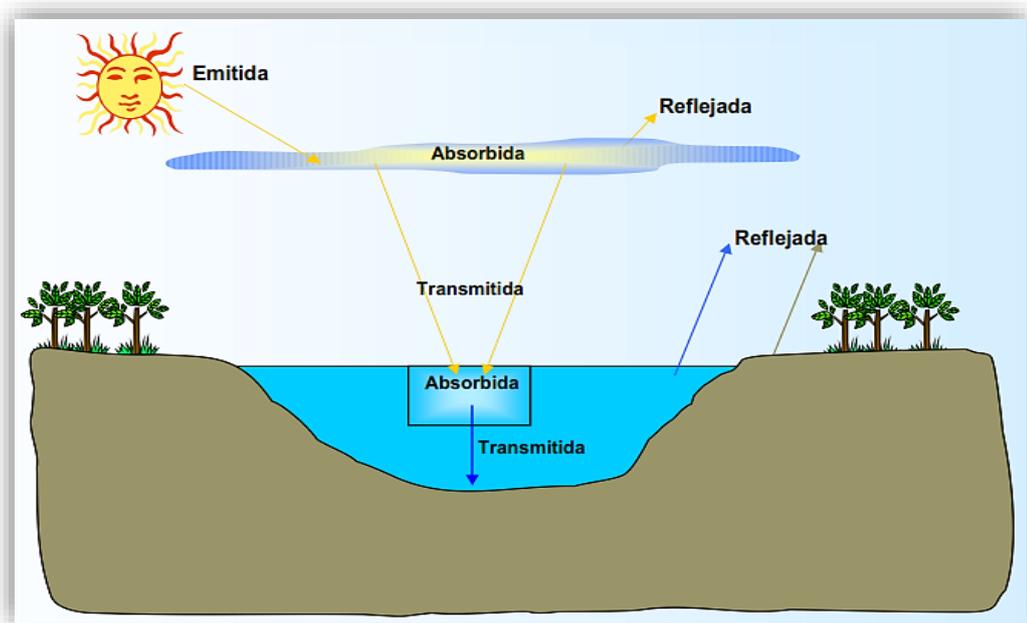


Figura 4. Interacción Radiación – Energía.
Fuente/Elaboración: El Autor.

El flujo de energía reflejada que recibe un sensor, depende de factores externos como:

- Condiciones atmosféricas: Existencia de la presencia de nubosidad, lluvia etc.
- Emplazamiento ambiental: Características de la superficie, como vegetación, agua, etc.
- Geometría de la observación: Depende del ángulo con que el objeto refleja la energía incidente. Se puede diferenciar en dos tipos: Especulares, las que reflejan la energía en el mismo ángulo incidente y Lambertianas, que reflejan la energía en todas las direcciones (Chuvienco, 2016).

1.1.4. Sensores.

Los sistemas de teledetección presentan tres componentes principales: fuente energética, superficie terrestre y sensor de recepción. El último está clasificado según la forma en que recibe energía (Chuvieco, 2016; Olaya, 2014). Existen dos tipos de sensores:

➤ Sensor pasivo.

Registra la radiación electromagnética emitida por el objeto. Se divide en función al procedimiento para recibir radiación procedente, los tipos son: cámaras fotográficas y exploradores de barrido o empuje.

➤ Sensor activo.

Posee fuentes internas que generan artificialmente energía o radiación, (Chuvieco, 2016). Los instrumentos principales son:

✓ *Radar.*

Es un acrónimo derivado de las palabras Radio Detection and Ranging, porque trabaja en una banda del espectro comprendida entre 1 mm a 1 m, en la banda cercana al espectro microondas (Gorokhov, 2009).

Las microondas artificiales enviadas en una dirección determinada que chocan con los objetos, son reflejadas y dispersadas. La energía reflejada o dispersada, analiza la señal de recepción para determinar la localización y propiedades de los objetos. Mediante el tiempo que tarda un pulso de radiación en ir y volver, se mide la distancia recorrida y se puede generar MDE (Neiza, 2011). Los radares se usan para detectar la precipitación y otros eventos meteorológicos, como también objetos atmosféricos o marítimos (aviones, barcos, etc.) debido a su capacidad de atravesar las nubes (Gorokhov, 2009).

✓ *LiDAR (Light Detection And Ranging):*

Es un láser que emite pulsos de luz de una señal modulada en el espectro infrarrojo cercano. Las longitudes de onda están en el rango de 800 nm a 1060 nm, que corresponden a una longitud de onda menor comparado con radares convencionales (Gold, 2005). De acuerdo a los principales tipos de dispersión, existen los siguientes sistemas: resonancia, absorción diferencial y de

fluorescencia inducida, los que son orientados a aplicaciones específicas que se trataran más adelante (Campoverde y Satián, 2015; García, 2012).

1.1.5. Plataformas de la Teledetección.

Se entiende por plataforma de teledetección al espacio que contiene los instrumentos necesarios para captar, almacenar y transmitir información a distancia (Sarria, 2006). Estas plataformas se dividen en tres categorías: terrestres, aéreas y de satélite (Wojtowicz, Wojtowicz, y Piekarczyk, 2015); (Fig. 5).

- Terrestres: A nivel del suelo o a pocos metros de altura: vehículos, grúas, drones.
- Aéreas: Hasta 10 kilómetros de altitud: aviones, helicópteros y globos aerostáticos
- Satelitales: Entre los 10 km y los 40.000 km: Estación Espacial Internacional y los satélites automáticos de Teledetección.

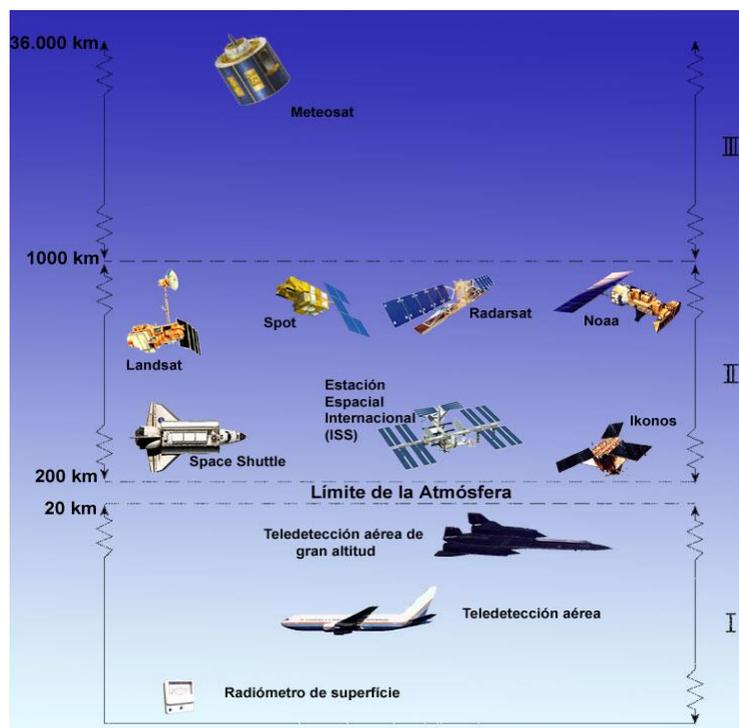


Figura 5. Plataformas de teledetección.

Fuente: <https://goo.gl/dDbvta> (2017)

Elaboración: El Autor.

Los avances de la tecnología han permitido que los sistemas LiDAR, se puedan clasificar en función a su plataforma de transporte, García (2012) describe los siguientes sistemas:

- Aerotransportados.
 - Topográficos: operan en el infrarrojo cercano con longitudes de onda entre 700 nm y 1300 nm, por ejemplo, ALS (Airborne Láser Scanner).
 - Batimétricos o atmosféricas: operan en el infrarrojo cercano con longitudes de onda entre 500 nm y 600 nm, por ejemplo, AHL (Airborne Hydrographic Láser).

- Terrestres:
 - Fijos: se ubican en un punto determinado para escanear a su alrededor, por ejemplo, tenemos a TLS (Terrestrial Laser Scanning).
 - Móviles: Siguen una ruta de escaneo, tenemos a Mobile Laser Scanning.

De acuerdo al tipo de láser (A. M. García, 2012), se clasifican en:

- Pulso: consiste en medir el tiempo transcurrido desde la emisión de un pulso hasta su recepción, lo utilizan sensores comerciales.
- Medición de fase: En un proceso de emisión continuo de haces de luz, se mide la diferencia entre la señal emitida y reflejada conocida como fase.

Además, se pueden clasificar de acuerdo al tipo o forma de escaneo (Höhle y Potuckova, 2011):

- Líneas
- Zigzag.
- Elíptico
- Palmer.

Las geometrías de escaneo usada por LiDAR se resumen en la Figura 6.

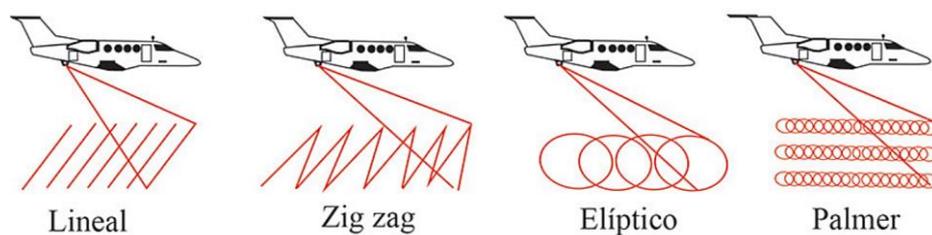


Figura 6. Geometrías de escaneo.
Fuente / Elaboración: (Ruíz, Garro, y Soto, 2014).

1.2. LiDAR

1.2.1. Generalidades.

Los datos topográficos son necesarios para aplicaciones donde la elevación es un parámetro importante. Una de las técnicas actuales de la recolección de datos topográficos es por medio de LiDAR. Esta técnica permite determinar la elevación de objetos a través de la medición del tiempo de recorrido de un impulso láser, que es emitido y posteriormente recibido por un sensor a bordo de una plataforma aérea (aerotransportador) (Jianyu, 2013). Los sensores modernos permiten generar aproximadamente hasta 800000 pulsos en un segundo (800 kHz), y digitalizar los múltiples retornos incluyendo su intensidad (Arranz, 2013; Galarza, 2014; Torre Tojal, 2016). Con la ayuda de los componentes LiDAR, se puede obtener un conjunto de datos con las coordenadas de los puntos reflejados de la superficie (nube de puntos).

1.2.2. Funcionamiento:

Un sensor LiDAR se transporta sobre una plataforma aérea, siguiendo una ruta previamente determinada para el caso de estudio. Durante el vuelo, el sensor transmite continuamente rayos láser hacia los objetos situados en la superficie terrestre y almacena la información captada (Lee et al., 2009).

Después del vuelo, se obtiene dos conjuntos de datos a partir de sus componentes: (i) IMU (Unidad de Medida Inercial) / GPS (Sistema de Posicionamiento Global) y (ii) de los receptores del sensor las distancias hacia los objetos incluyendo el ángulo de barrido (Mosquera, 2017). Los receptores del sensor, registran el tiempo preciso desde que el pulso láser sale de la plataforma hasta la detección de su retorno. A partir del tiempo medido se puede determinar

la distancia entre el sensor y la superficie u objetos, aplicando la siguiente ecuación (Fujii y Fukuchi, 2013):

$$R = 0.5 * t * c \quad (1)$$

Dónde:

- R: Distancia entre el sensor y el objeto (m)
- t : Intervalo de tiempo entre la salida y llegada del láser (s)
- c : Velocidad de la luz (300000 kms⁻¹)

Debido a la posición de la plataforma aérea, la cual es conocida por el GPS; el sistema genera una densa nube de puntos, en los tres componentes espaciales (coordenadas X, Y, Z), que describen la superficie escaneada por el sensor.

Adicionalmente, varios estudios establecen una relación entre la señal detectada por el receptor LiDAR, (desde cierta distancia) y la energía promedio emitida en cada pulso láser (Grejner-Brzezinska et al., 2005; Nisperuza Toledo, 2010; Roa Lobo y Kamp, 2008; Salamanca y Pérez, 2008; Wandinger, 2012). Los procesos de dispersión son independientes, es decir que sólo se produce dispersión simple, se aplica la siguiente ecuación analógica general (Salamanca Céspedes, 2013; Wandinger, 2012):

$$P_{(R)} = K \cdot G_{(R)} \cdot \beta_{(R)} \cdot T_{(R)} \quad (2)$$

Dónde:

- $P_{(R)}$: La intensidad recibida desde una distancia R

Los demás factores se describen a continuación:

- K : Describe el rendimiento del equipo LIDAR.(Wandinger, 2012)

$$K = P_o \frac{c \cdot \tau}{2} A \eta \quad (3)$$

Tenemos a P_o , como la potencia media de un pulso; $c \cdot \tau$ es la longitud temporal del pulso; $1/2$ es un factor que describe la mitad del tiempo la ida y vuelta del pulso; A es el área óptica del sensor primario; y η es la eficiencia global del sistema.

$G_{(R)}$: Rango de medición que depende de la geometría (Wandinger, 2012).

$$G_{(R)} = \frac{O_{(R)}}{R^2} \quad (4)$$

Factores que dependen de: la superposición o solapamiento entre el área iluminada por el láser $O_{(R)}$ y campo de vista del receptor R^2 , tiene un valor de 1 en la zona donde se traslapan y 0 en otra región (Salamanca y Pérez, 2008).

$\beta_{(R)}$: Coeficiente de dispersión,

Se toma en cuenta el efecto que tienen las propiedades de la atmósfera para dispersar la luz (Salamanca y Pérez, 2008; Wandinger, 2012).

$$\beta_{(R,\lambda)} = \sum_j N_{(R)j} \frac{d \cdot \sigma_{j.sca}(\pi,\lambda)}{d \cdot \Omega} \quad (5)$$

$N_{(R)j}$ es la concentración de partículas de dispersión de una clase j en el volumen iluminado por el pulso láser, y $\frac{d \cdot \sigma_{j.sca}(\pi,\lambda)}{d \cdot \Omega}$ son las partículas diferenciales de la sección de dispersión para la dirección hacia atrás en la longitud de onda λ . La suma de todas las dispersiones está en $m^{-1}sr^{-1}$. La concentración se determina en unidades de m^{-3} , el diferencial de dispersión en la sección transversal en m^2sr^{-1} .

En la atmósfera, la señal del láser puede ser dispersada por las moléculas de aire y partículas, es por eso que se suman las dos componentes de la siguiente manera (Salamanca y Pérez, 2008; Wandinger, 2012):

$$\beta_{(R,\lambda)} = \beta_{ma(R,\lambda)} + \beta_{mp(R,\lambda)} \quad (6)$$

$T_{(R)}$: Describe la transmisión y la cantidad de luz perdida entre la salida y su retorno También toma valores comprendidos entre 0 y 1 (Salamanca y Pérez, 2008; Wandinger, 2012).

$$T_{(R,\lambda)} = e^{[-2 \int_0^R \alpha_{(R,\lambda)} dr]} \quad (7)$$

La integral considera la trayectoria del LiDAR a la distancia R. El factor 2 representa una trayectoria de transmisión de ida y regreso de la luz. La extinción de luz es la suma de todas las pérdidas de transmisión donde $\alpha(R, \lambda)$ es el coeficiente de extinción (Wandinger, 2012).

Recapitulando las ecuaciones anteriores, la ecuación general LiDAR para la detección analógica de pulsos de luz se puede escribir de la siguiente forma (Salamanca y Pérez, 2008; Wandinger, 2012):

$$P_{(R)} = \left[P_o \frac{c \cdot \tau}{2} A \eta \right] * \left[\frac{O_{(R)}}{R^2} \right] * \beta_{(R,\lambda)} * \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(R, \lambda) dr \right] \quad (8)$$

Debido a la complejidad del cálculo y a la infinidad de puntos obtenidos por el sistema LiDAR, existen softwares que facilitan el procesamiento de los datos, los cuales se explicaran más adelante.

1.2.3. Componentes.

➤ Sensor/ escáner.

Consiste en un transmisor y un receptor de pulsos de luz con longitudes de onda de pocos a varios nanosegundos con propiedades espectrales generadas por el láser y un ángulo de exploración hasta 75 ° (Galarza, 2014). El transmisor emite el pulso, el cual es reflejado y transmitido a la atmósfera, porque interactúa con las partículas atmosféricas u objetos encontrados con la superficie terrestre (A. M. García, 2012). Esto puede causar la dispersión del pulso en función del tipo de elemento encontrado (P. Ruíz et al., 2014). La energía de retorno se recoge por un telescopio (receptor), que a su vez la transmite a través de un filtro óptico a un foto-detector (Salamanca y Pérez, 2008). Esta señal eléctrica es grabada y posteriormente almacenada en un ordenador (Liu y Zhang, 2008). En función del tiempo y la intensidad de la señal de retorno, se deduce la altura de los objetos respecto al nivel del mar.

- GPS (Sistema de Posicionamiento Global)
Se basa en dos equipos, los cuales están conectados con los satélites de radionavegación. El GPS, consiste en una estación base, donde las coordenadas x,y,z son conocidas, y un sensor portátil que registra su ubicación precisa (Sarria, 2006). Durante el vuelo, el sensor está conectado por radio con la estación base, que puede calcular la ubicación de un objeto mediante un post-procesamiento de las coordenadas exactas del sensor portátil (Garcia y Ruiz, 2014). Para mantener una precisión adecuada, el sensor portátil no debe alejarse más de unas 50 millas (~80 km) de la estación base (Garcia y Ruiz, 2014; UPC, 2010).

- IMU (Inertial Measurement Unit):
Otro componente del sistema LIDAR es la Unidad de Medida Inercial IMU; permite determinar: la posición, orientación y velocidad a la que se mueve el sensor sobre una plataforma, trabaja conjuntamente con la estación de base (H. Liu, 2010). Esto sirve para realizar correcciones diferenciales en la fase de post procesamiento y obtener mejores precisiones en la determinación de la ubicación de los objetos sobre la superficie terrestre. (Garcia y Ruiz, 2014)

- Sistema de control:
Consta de una computadora con un software apropiado para el sensor LiDAR utilizado, algunos sistemas suelen llevar a bordo una cámara de alta resolución o de video (Garcia y Ruiz, 2014).

1.2.4. Fuentes de error.

Cada componente del sistema LIDAR tiene una precisión diferente. Por lo general, el sensor tiene una exactitud entre 1 y 5 cm, el GPS una precisión entre 2 a 5 cm (A. M. García, 2012). Debido a la turbulencia, giro u orientación del avión el ángulo de barrido del sensor es aproximadamente 0.01° , la IMU tiene una inclinación menor a 0.008° y la divergencia del haz esta entre 0.25 y 5 rad (García, 2012; Tobergte y Curtis, 2013b). La precisión conjunta del sistema puede oscilar desde 5 a 20 cm en z, y hasta 50 cm en x,y, lo cual es una precisión bastante aceptable en comparación a otros sistemas de obtención de información digital terrestre (A. M. García, 2012). Sin embargo el producto obtenido a partir de datos LiDAR puede ser susceptible a cualquiera de los siguientes errores (Bater y Coops, 2009; Molina Simbaña, 2016; Su y Bork, 2006; UPC, 2010):

- Asociados con: el sensor láser, los sistemas de navegación, el posicionamiento durante la adquisición de datos del escáner láser respecto al IMU, y del IMU respecto al GPS, además los ángulos de la plataforma (roll, pitch, heading).
- De incertidumbres geométricas relacionadas con: altitud de vuelo, el ángulo de escaneo, topografía local.
- En la etapa de post-procesamiento: clasificación de puntos, interpolación de la superficie.
- Entre otros: Condiciones atmosféricas y ambigüedad en la superficie respecto a las propiedades reflectantes o geométricas, etc.

1.2.5. Ventajas y desventajas.

LiDAR tiene ventajas respecto a otros métodos de Teledetección, las que se describen a continuación (Papasaika-Hanusch, 2012; Salamanca y Pérez, 2008):

- Precisión:
 - Vertical: 5-20 cm
 - Horizontal: 30-50 cm
- Adquisición y procesamiento:
 - Adquisición: 1000 km² en 12 horas
 - Generación de MDE de 1000 km² en 24 horas
- Tiempo y condiciones de Luz:
 - Independiente de la inclinación de los rayos solares, se puede trabajar en la noche y en condiciones meteorológicas adversas como niebla.
- Superficie en estudio
 - LiDAR puede obtener información detallada de cualquier tipo de terreno, también es ideal para zonas en las que su acceso es difícil.

➤ Densidad:

La señal puede emitir hasta 300 kHz o pulsos por segundo y la nube de puntos puede implicar hasta 25 puntos por m², los cuales son obtenidos de múltiples retornos. Pero no se aceptan pulsos menores a 45 kHz, ni la nube de puntos menores a 0.5 puntos del primer retorno por m² (Molina Simbaña, 2016; Torre Tojal, 2016).

➤ Costo de levantamiento de datos:

Los costos dependen de muchos factores como: el tipo de aplicación, la precisión requerida, la distancia entre la zona de estudio y el aeropuerto base, el tiempo de vuelo para cubrir dicha área, etc. El precio por proyecto tiene una base mínima de 4000 USD por km², se realiza a partir de áreas mayores a 10 km², sin contemplar las variables anteriores, por lo que fácilmente el valor se puede incrementar. No obstante, de la información recopilada se puede obtener varios productos, como: Modelos Digitales de Elevación, Curvas de Nivel, Nube de puntos en formato .LAS, Ortofotos, Planimetría, etc. En conclusión, los costos en la adquisición de datos mediante LiDAR aéreo es preferible y económico para grandes superficies de terreno, además, el costo del equipo puede superar un millón y medio de dólares (Molina Simbaña, 2016).

Según López Sánchez, (2010) entre las principales desventajas tenemos:

- Con vientos fuertes o turbulencias se puede tener errores en el sistema inercial.
- La precisión de la información disminuye con la altura. Si la altura de vuelo del LiDAR aéreo está entre 800 a 2500 m.s.n.m. se tendrá una precisión vertical entre 9 a 18 cm y horizontal entre 0.2 a 1 m.

1.2.6. Aplicaciones

➤ Hidrología e Hidráulica:

En estudios hidrológicos, es necesario determinar las características de una cuenca hidrográfica y su respuesta hidrológica (Sellers, Corbelle, Buján, y Miranda, 2015). En base a información LiDAR se puede implementar estudios para mitigar desastres naturales, generar modelos de predicción y simulaciones

hidráulicas, como también para determinar zonas de peligro para inundaciones y planificar operaciones de socorro, rescate (Burgos, 2012). En proyectos hidro – energéticos se puede analizar, proyectar y estimar la capacidad de los futuros embalses (Galarza, 2014). Además, a partir de la elevación del terreno se puede realizar diseños, para obras de drenaje, agua potable, alcantarillado, riego etc.

➤ *Geología, Geotecnia, Minería, Vialidad y Líneas eléctricas:*

Se puede evaluar hundimientos, deslizamientos, áreas de afección, cálculo de volúmenes de material deslizado, planificación de medidas de mitigación, etc. (ALTITUM, 2017). También debido a la información de alta resolución se obtiene mapas de la topografía a detalle que sirve para: avances de explotación, zona de acopio de stock, monitoreo ambiental, mapeo de contaminación, planificación de caminos, para apertura o ampliación vial, detección automática de fallas, cálculos de distancias de visibilidad (CARTOMEX, 2016; Santos Berbel et al., 2014). Además, con la información en alta resolución se puede diseñar líneas de transmisión, detectar problemas asociados a la infraestructura eléctrica, como vegetación en contacto con las líneas de transmisión, inclinación de los postes o torres, deflexión excesiva de la catenaria de las líneas de transmisión. (ALTITUM, 2017; Mosquera, 2017)

➤ *Urbanismo, Catastros, Arqueología, Construcción e Infraestructura:*

Con la información en alta resolución se puede simular corredores urbanos, altura de edificaciones, planificar asentamientos, estudios catastrales y de ordenamiento territorial, visualización, rehabilitación de estructuras patrimoniales, áreas de construcción, uso del suelo y arqueología (Campoverde y Satián, 2015; Mosquera, 2017). Además, permite desarrollar sistemas integrados en la modelación de la información de construcción (BIM), “As Built”, modelado 3D de cualquier estructura, construcción e impresión 3D de archivos BIM desde las nubes de puntos (Hacker, 2016; P. Kumar y Prakash, 2017).

➤ *Otros:*

En estudios de recursos forestales, para el cálculo de la biomasa, inventario forestal, zonas deforestadas, cobertura vegetal (Gonzalez, Bujan, Gonzalez-Ferreiro, Barreiro-Fernandez, y Dieguez-Aranda, 2013). Además, se utilizan para la animación y video, para texturas en modelado 3D. Actualmente los principios del sensor LiDAR son necesarios para fabricar vehículos autónomos.

En nuestro país, la tecnología LiDAR se ha empleado en diversos mega proyectos, entre los más destacados podemos mencionar: el levantamiento nacional de información predial SIGTIERRAS con el fin de obtener la cartografía básica oficial actualizada de Ecuador continental (IGM, 2009); Multipropósito PUMA, que busca dotar de agua para consumo, riego y generación hidroeléctrica en los cantones de Azogues en Cañar y Paute en Azuay (EL Mercurio, 2014; SENAGUA, 2014); Proyecto de riego PACALORI para asegurar el aprovechamiento de agua en épocas lluviosas y dotar en épocas de sequía, desarrollado en la provincia de los Ríos (El Tiempo, 2013; PROMAS, 2014); Proyecto de aprovechamiento hidroeléctrico Río Zamora-Santiago (CELEC E.P., 2013); también en la actualización catastral de GAD's Municipales como Machala, Ibarra y en lo que va del año en Manta (GADM-Ibarra, 2016; GADM-Machala, 2016; GADM-Manta, 2017).

1.3. Modelos Digitales de Elevación (MDE).

Un Modelo Digital de Elevación (MDE), es una representación numérica de la elevación [Z] sobre un plano [X, Y], ubicada dentro de un marco geodésico (Loaiza, 2017; Olaya, 2014). Un MDE puede ser generado de diferentes fuentes como: la conversión analógica a digital de mapas cartográficos o curvas de nivel, obteniendo así un modelo TIN (Triangular Irregular Network, en español redes irregulares de triángulos) (Ravibabu, Jain, Singh, y Meeniga, 2010). También se puede generar MDE en base de datos obtenidos de Teledetección, p. ej. aplicando métodos de procesamiento de imágenes satelitales o fotogrametría y de radares de apertura sintética (Jiang, Zhang, y Ming, 2008). Sin embargo, en la actualidad los MDE más precisos provienen de las mediciones LiDAR (Sellers et al., 2015).

No obstante, los MDE no son libres de errores, los cuales ocurren generalmente durante la medición (p. ej. atributos de los datos originales) o el procesamiento de la información (p.ej. algoritmos de modelamiento o proceso) como también son causados por factores del terreno (p.ej. características de relieve) o de las condiciones atmosféricas (p.ej. nubosidad) (C. Liu, Sun, y Wu, 2010; Yue et al., 2017).

1.3.1. Modelos Digitales de Terreno.

Los Modelos Digitales del Terreno (MDT): son representaciones digitales de la superficie terrestre, similar a un MDE, que excluye todos los elementos que se encuentran sobre el

terreno (Fig. 7). Para obtener estos modelos a partir de los datos LiDAR, se debe filtrar e interpolar los puntos del último pulso (Distancia más larga; Galarza, 2014).

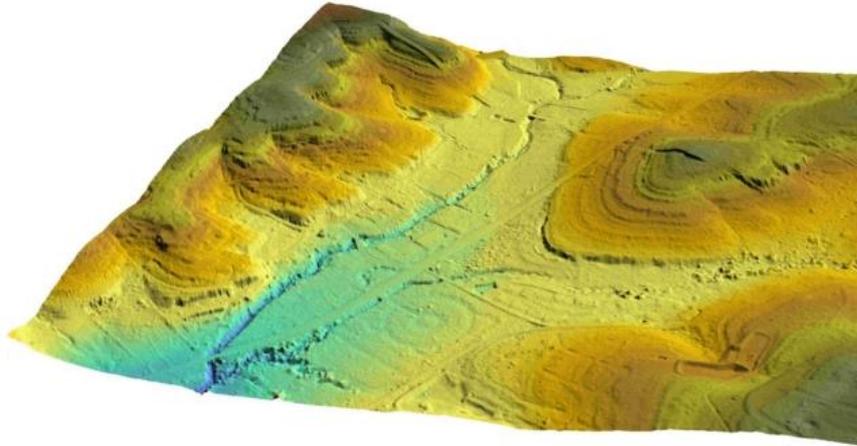


Figura 7. MDT.
Fuente: (Hernández, 2015)
Elaboración: El Autor.

1.3.2. Modelos Digitales de Superficie.

Los Modelos Digitales de Superficie (MDS), son representaciones digitales de todos los elementos que se encuentran sobre la superficie del suelo incluido la vegetación, edificios, entre otros objetos (Fig. 8). De los datos LiDAR, se obtiene esta información mediante interpolación de puntos del primer pulso recibido (distancia más corta) y se puede diferenciar las alturas de las construcciones, vegetación, puentes, vehículos, etc. (Galarza, 2014).



Figura 8. MDS.
Fuente: (Hernández, 2015)
Elaboración: El Autor.

1.3.3. Tipos de datos.

Los MDE, pueden ser almacenados principalmente en dos estructuras de datos:

➤ Ráster.

Es un conjunto formado por celdas del mismo tamaño, ordenadas en filas y columnas, que contienen un valor único representativo para cada superficie delimitada. Cada capa ráster está formada por cuatro elementos: valores numéricos, información geométrica, tabla de colores, etiqueta descriptiva de texto (Felicísimo, 1994; Sarria, 2006). Es un formato fácil de almacenar y manipular, se puede integrar con la base de datos ráster, muestra una mejor apariencia de los elementos terrestres. Además, no usa tamaños diferentes de píxel para mostrar zonas de complejidad topográfica, a mayor resolución de la celda, mayor será el tamaño del archivo (Baron y Byrne, 2003). El formato utilizado para intercambio de datos desde satélites es GeoTIFF (Tagged Image File Format) (Planet Labs, 2015).

- TIN(Triangulate Irregular Networks).

Es un conjunto formado por puntos irregulares, conectados a través de triángulos que no se superponen, cuyos vértices corresponden a la elevación de la superficie del punto de muestreo. La irregularidad de los triángulos depende de la irregularidad del terreno (D. N. Kumar, 2014). Puede describir la superficie a diferente resolución, es eficiente en el almacenamiento de datos, pero en algunos casos requiere revisión y control manual en la red (Baron y Byrne, 2003).

1.3.4. Fuentes de datos de elevación.

Según Felicísimo (1994), Olaya (2014), Guzmán (2015), existen diferentes métodos para la elaboración de un MDE:

- Directos: Cuando los datos son tomados directamente sobre el terreno, mediante levantamiento topográficos, GPS, Estación Total, o sensores que emiten un pulso electromagnético directamente a la superficie y reciben las reflexiones (Sesnie et al., 2016).
- Indirectos: Cuando los datos no son tomados directamente sobre el terreno. Se utilizan documentos existentes. Los documentos incluyen pares de imágenes estéreo digitales o analógicas de la fotogrametría (Schenk, 2005), técnicas de interferometría (Leoni, Spencer, Coli, Coppi, y Michelini, 2016) y digitalización de cartas topográficas o curvas de nivel.

1.3.5. MDE globales disponibles gratuitamente.

A continuación, se describen las principales fuentes satelitales de MDE que cubren la mayoría de la superficie terrestre y son de acceso público:

1.3.5.1. MDE ASTER GDEM V2.

El Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM), es uno de los cinco sensores del satélite TERRA lanzado

al espacio el 18 de diciembre de 1999 en cooperación entre la NASA y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) (Abrams et al., 2015; Urai, Tachikawa, y Fujisada, 2012). El objetivo de la misión es entender de mejor manera los procesos de interacción entre la superficie de la Tierra y la atmósfera (González, 2016). TERRA se encuentra en una órbita heliosincrónica a una distancia de 705 kilómetros desde la superficie terrestre, su ancho de barrido de 60 kilómetros con un ciclo de repetición de 16 días (Abrams et al., 2015; Tachikawa, Kaku, et al., 2011; Tachikawa, Hato, Kaku, y Iwasaki, 2011). A través de telescopios separados y un sistema de sensores, el satélite recolecta imágenes en 14 bandas espectrales entre el ultravioleta e infrarrojo, las cuales son: 5 bandas infrarrojas térmicas (TIR) con resolución de 90 m, 6 bandas infrarrojas de onda corta (SWIR) con resolución de 30 m y 3 bandas visibles e infrarrojo cercano (VNIR) con resolución de 15 m (Tachikawa, Kaku, et al., 2011). Las bandas VNIR permiten la creación del MDE.

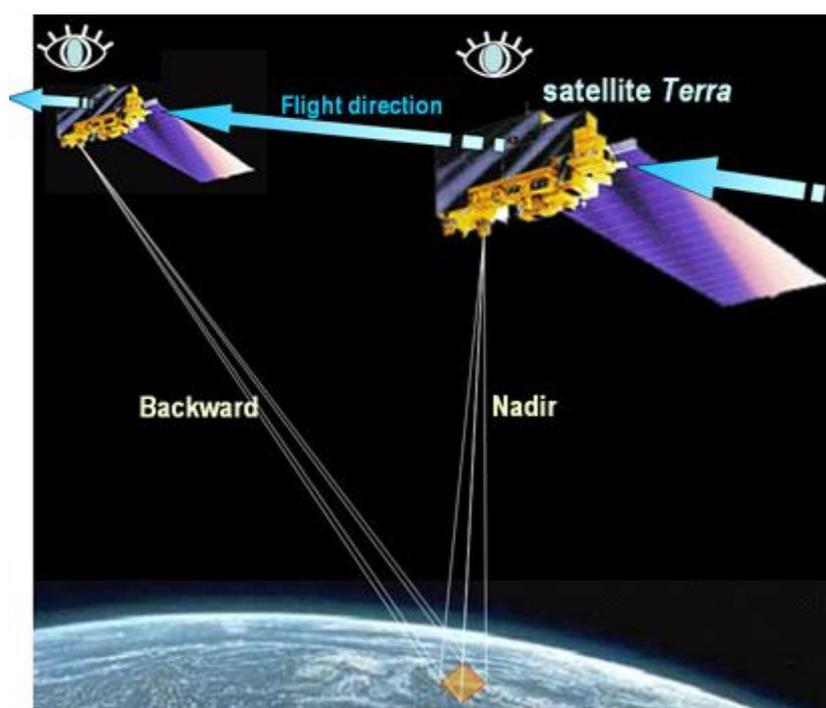


Figura 9. Satélite TERRA, Dirección de vuelo: hacia atrás & NADIR.
Fuente:(JSPACESYSTEMS, 2011)
Elaboración: El Autor.

El método de recolección de información mediante el sensor VNIR para crear un MDE incluye 2 telescopios (D. N. Kumar, 2014). Un telescopio es de observación directa (NADIR; Fig. 9), utiliza 3 bandas, y el otro observa hacia atrás (Backward; Fig. 9) una sola banda (Abrams et al., 2015). Los telescopios proporcionan una imagen estéreo de la zona de cobertura, de esta

manera los datos almacenados se denominan Nivel 1-A. (González, 2016). La recolección de la información empezó en febrero del 2000 (Tachikawa, Hato, et al., 2011).

La generación de MDE globales se ha desarrollado en dos etapas. En la primera etapa se compilaron 1,6 millones de imágenes en el nivel 1-A, pero, presentó inconvenientes en la calidad incluyendo anomalías en los valores de elevación (Avtar, Yunus, Kraines, y Yamamuro, 2015). Los MDE de la primera etapa fueron liberados al acceso público a partir del 29 de junio del 2009 (Avtar et al., 2015). Desde ese entonces han mejorado la metodología para la generación de MDE y evitar interferencias atmosféricas, presencia de ruido etc. (L. Pérez, 2016). En la segunda etapa se crearon MDE de mejor exactitud y resolución tanto horizontal como vertical, y además se mejoró la representación de cuerpos de agua (Ravibabu et al., 2010). Para estos MDE utilizaron 260000 pares de imágenes estéreo adicionales que fueron liberados el 17 Octubre del 2011 (González, 2016; Perez, 2016; Urai, Tachikawa, y Fujisada, 2012).

1.3.5.2. SRTM.

Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) fue producto de una cooperación entre la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA), la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) como también de agencias espaciales de Alemania e Italia (Avtar et al., 2015). La misión STS-99 lanzó al espacio el transbordador Endeavour que contenía un sistema de radar, denominado SRTM, con el objetivo de obtener datos de elevación topográfica de aproximadamente el 80% de la superficie terrestre entre 56°S a 60°N (Mukherjee et al., 2012). La misión duró 11 días, entre el 11 y 22 de febrero del 2000, Endeavour orbitó 16 veces al día alrededor de la Tierra, completando 176 órbitas en total (Avtar, Yunus, Kraines, y Yamamuro, 2015; Farr et al., 2005).

SRTM consiste en dos radares de apertura sintética: un sistema de banda-C (SIR-C) y un sistema de banda-X (X-SAR) (Farr et al., 2005). El sistema consiguió datos a lo largo de franjas continuas de 225 km de largo y 50 km de ancho, desde una altura de 233,1 km (Fig. 10). En principio el radar X fue solo una demostración experimental, pero tenía una resolución mejor comparado con el radar C (Cushing, 2008; EO, n.d.). Finalmente, debido a esta ventaja, el radar X fue utilizado para el control de calidad y procesamiento del radar C. El sistema consta de una antena principal, y otra secundaria de salida con una separación de 60 m entre ellas. La antena principal emitía ondas de radar (microondas) hacia la superficie terrestre, y la

otra antena recoge las ondas de rebote (Fig. 10) (Farr et al., 2005; Neiza, 2011; Rodriguez, Morris, y Belz, 2006; Urai et al., 2012). Debido a la distancia constante entre las dos antenas se obtuvo los datos de elevación.

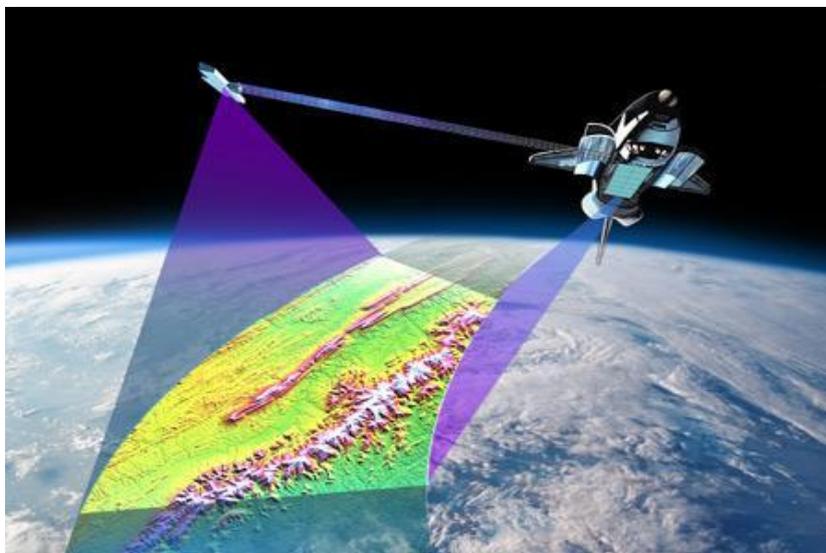


Figura 10. Misión SRTM.

Fuente: (Simon, 2015)

Elaboración: El Autor.

Mediante la técnica de “interferometría” que se refiere a la recolección de dos imágenes de radar de una misma área, pero en distintas posiciones de captura, se crearon los MDE globales. En el 2003 la NASA publicó los primeros MDE de la misión SRTM con una resolución espacial de 30 m para Estados Unidos y de 90 m para el resto del mundo, debido a que el conjunto de datos contenía áreas vacías principalmente en zonas de montañas y desiertos (Mukherjee et al., 2012). Sin embargo, se realizaron procedimientos adicionales para la edición o eliminación de zonas sin datos, como también ajustes verticales, definición y nivelación de cuerpos de agua (Roa Lobo y Kamp, 2008). Además, utilizaron datos de ASTER del USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) para rellenar esas celdas vacías. Se desarrollaron MDE consecutivos (2, 3, 4 y 4.1), los cuales fueron puestos a disposición del público a finales del 2014 con una resolución espacial de 30 m. (Falorni, Teles, Vivoni, Bras, y Amaratunga, 2005; Rexer y Hirt, 2014; Sadeq, 2012).

A finales del 2017, está previsto la liberación de un nuevo producto denominado NASADEM, que mostrará mejoras en el procesamiento, control de elevación y relleno de huecos, basado en los datos originales de SRTM y combinación con otros MDE (Yamazaki et al., 2017). Según Crippen et al. (2016), los nuevos MDE tendrán una resolución más fina de aproximadamente 12 m.

1.3.5.3. ALOS PALSAR.

El Satélite Avanzado de Observación Terrestre (ALOS), también llamado DAICHI, desarrollado por la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA), fue lanzado desde el Centro Espacial de Tanegashima en Japón, el 24 de enero del 2006 (JAXA, 2008). ALOS contiene tres sensores, dos captan imágenes ópticas (PRISM y AVNIR-2), y el tercero es un radar de banda L de apertura sintética (JAXA EORC; RESTEC, 2006). Éste sistema tenía como fin obtener información fiable de la superficie terrestre, incluyendo la cartografía, observación regional, monitorear desastres y recursos naturales (JAXA EORC; RESTEC, 2006; Mitchell et al., 2012).

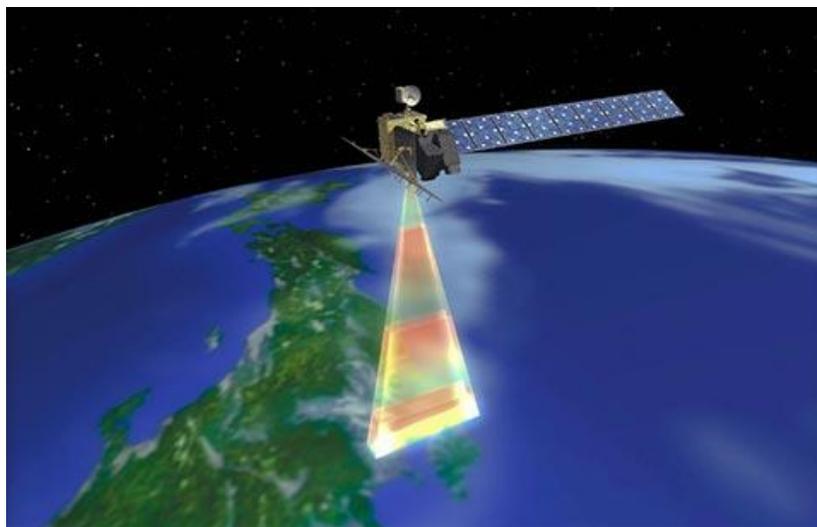


Figura 11. Satélite ALOS.
Fuente: <https://goo.gl/anrKXD> (2017)
Elaboración: El Autor.

La recolección de información inició el 16 de mayo del 2006, en una órbita heliosincrónica circular a una altura de 691.65 km, con un ciclo de repetición de 46 días (Mitchell et al., 2012). El ancho de barrido es de 250 a 350 km. ALOS es considerado como uno de los satélites más grandes, cuyas dimensiones son: 3.5 m de ancho x 4.5 m de largo x 6.5 m de alto (Suzuki, 2014). El 22 de abril del 2011 dejó de emitir datos hacia las estaciones terrestres debido a una anomalía en la generación de energía de los paneles solares (Mitchell et al., 2012). Los datos de esta misión están disponibles gradualmente desde el tercer trimestre del 2016 con resolución de 12.5 m. (JAXA, 2008; Mitchell et al., 2012; Rosenqvist, Shimada, y Watanabe, 2004; Spazio, 2016).

El 24 de mayo del 2014, se puso en órbita otra misión, denominada ALOS 2, que continua con la recolección de información de la superficie terrestre con considerables mejoras en sus

sensores (Suzuki, 2014). Además, según fuentes oficiales se prevé una misión ALOS 3 en el 2019 que tendrá una resolución de 1 m, para franjas de 50 km (Spazio, 2016).

1.4. La cuenca hidrográfica y sus características morfométricas.

Una cuenca hidrográfica es una parte de la superficie terrestre, que capta la precipitación en esta área y la conduce por medio de un curso natural de agua al punto más bajo. Este punto de desembocadura o salida, se puede ubicar dentro de los límites de la cuenca denominada endorreica (p.ej. Lago Titicaca) o fuera de ella denominada exorreica (p.ej. la mayoría de ríos que desembocan en el océano) (Ruiz y Torres, 2008). Una parte de la precipitación se dirige directamente al punto de salida (escorrentía superficial), otra se evapora y finalmente la otra se filtra en los suelos (recorrido vertical) a través de estratos subterráneos que pueden recargar acuíferos, de acuerdo a los rasgos geológicos a ésta última se denomina cuenca hidrológica (Fig. 12; Breña y Jacobo, 2006; Cahuana y Yugar, 2009). Mientras que en la cuenca hidrográfica, la línea divisoria une los puntos más altos de las laderas adyacentes, en la cuenca hidrológica no siempre coinciden las línea divisorias entre sí, porque esta última depende principalmente de la estructura hidrogeológica subterránea (Pike, Evans, y Hengl, 2009).

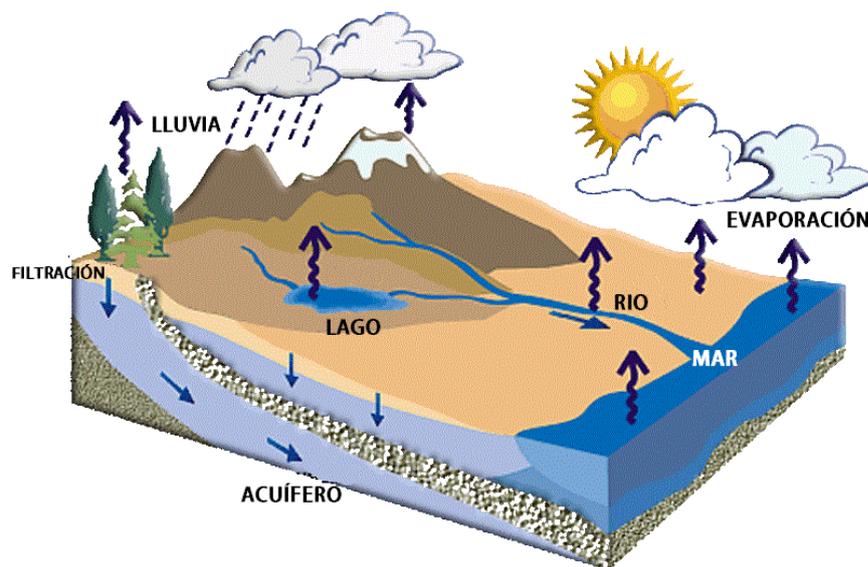


Figura 12. Precipitación en una cuenca hidrográfica.
Fuente: <https://goo.gl/HcGMfw> (2017)
Elaboración: El Autor.

Los parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica describen las características físicas que permiten evaluar el comportamiento de los caudales que transitan por ella (Breña y

Jacobo, 2006). Para el desarrollo del presente trabajo se consideran los siguientes parámetros:

1.4.1. Parámetros generales:

1.4.1.1. Área (A).

Es una superficie en proyección horizontal que abarca desde la línea divisora topográfica hasta la desembocadura de la corriente (Monsalve, 1999); El área de la cuenca está relacionada directamente con la cantidad de agua que se puede generar durante una crecida.

Según Aguirre (2007), en Ecuador, la clasificación aceptada de las cuencas es la siguiente:

Tabla 2. Clasificación de las cuencas hidrográficas.

CLASIFICACIÓN	ÁREA (km ²)
Mini cuencas	<40
Microcuencas	40-150
Sub cuencas	150-1000
Cuencas	1000-3000
Sistema hidrográfico	>3000

Fuente: (Aguirre, 2007)

Elaboración: El Autor.

Sin embargo, existen diversos criterios y clasificaciones para caracterizar las dimensiones de las cuencas. La clasificación que propone Campos-Aranda (1998) es la siguiente:

Tabla 3. Clasificación de las cuencas hidrográficas en función al tamaño.

CUENCA	TAMAÑO (km ²)
Muy pequeña	< 25
Pequeña	25 - 250
Intermedia – pequeña	250 – 500
Intermedia – grande	500 – 2500
Grande	2500 – 5000
Muy grande	> 5000

Fuente: (Campos-Aranda, 1998)

Elaboración: El Autor.

El área de una cuenca está estrechamente relacionada con la respuesta frente a la intensidad de las lluvias, en la que los factores importantes para una cuenca grande son la pendiente, elevación, área, red de drenaje; mientras, que para una cuenca pequeña los factores son tipo de suelo y vegetación. Además, las cuencas pequeñas son más sensibles a lluvias de alta intensidad y corta duración (M. Villón, 2002). En general se puede decir que cuanto mayor sean las diferencias altitudinales o también llamado índice de relieve, mayor será el error cometido en la medida del área (Jardí, 1985).

1.4.1.2. Perímetro (P).

Es la longitud del borde externo de la cuenca, tiene forma irregular y está proyectado sobre un plano horizontal.

1.4.1.3. Longitud Axial (L).

Es la medida en línea recta desde el punto de salida de la cuenca hasta el borde más lejano, que suele estar en la parte alta de la cuenca. Por lo general, la longitud axial está relacionada con el tiempo de concentración de la cuenca (Linsley, Kohler, y Paulhus, 1977).

1.4.1.4. Ancho medio (a).

Es la relación entre el área (km^2) y la longitud axial (km) (Oñate-Valdivieso, 2009).

$$a = \frac{A}{L} \quad (9)$$

1.4.2. Parámetros de forma.

Una cuenca tiene un área y perímetro definido, pero dos cuencas con un área similar no tienen el mismo comportamiento hidrológico debido a su forma. Por lo general una cuenca de forma circular tiene una respuesta hidrológica más rápida comparado con una cuenca alargada, debido a su longitud (Tiempo de concentración; Segerer y Villodas, 2006), los parámetros más utilizados son:

1.4.2.1. **Factor Forma (K_f).**

Es un valor adimensional, relaciona el área de drenaje con el cuadrado de la longitud axial y describe que tan alargada es la cuenca. Además, K_f es un indicador para la formación de inundación, grado de erosión y transporte de sedimentos en la cuenca, establecido por Robert E Horton en 1932 (Soni, 2016).

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (10)$$

Dónde:

A: Área de la cuenca (Km²)

L: Longitud axial (km)

Los valores de K_f se detallan en la Tabla 4:

Tabla 4. Valores interpretativos del factor forma.

RANGO	FORMA DE LA CUENCA
< 0.22	Muy alargada
0.22 – 0.30	Alargada
0.30 – 0.37	Ligeramente alargada
0.37 – 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 – 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 – 0.80	Ensanchada
0.80 – 1.12	Muy ensanchada
>1.20	Rodeando el desagüe

Fuente: (Coloma, 2015)

Elaboración: El Autor.

1.4.2.2. **Coficiente de compacidad o índice de Gravelius (K_c):**

Es un valor adimensional que relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo con área equivalente. El coeficiente K_c define la forma y la superficie de la cuenca que está relacionado con la escurrimiento y el hidrograma resultante de una precipitación dada (Sellers et al., 2015):

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (11)$$

Dónde:

P : Perímetro de la cuenca (Km)

A : Área de la cuenca (Km²)

Los valores de K_c se muestran en la Tabla 5:

Tabla 5. Valores interpretativos del coeficiente de compacidad de Gravelius.

RANGO	FORMA DE CUENCA	TIPO DE CRECIDAS
1.00 - 1.25	Redonda	Altas
1.25 - 1.50	Ovalada	Medias
1.50 - 1.75	Oblonga	
>1.75	Alargada	Bajas

Fuente:(Armijos, 2016)

Elaboración: El Autor.

1.4.2.3. *Relación de elongación (Re).*

Es un valor adimensional que compara la longitud del eje mayor de la cuenca con el diámetro de un círculo de igual área. Los valores cercanos a 1 indican relieves bajos, mientras que los valores entre 0.60 a 0.80 pendientes pronunciadas (Schumm, 1956).

$$Re = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L} \quad (12)$$

Dónde:

A : Área de la cuenca (Km²)

L : Longitud axial (Km)

1.4.2.4. Relación de circularidad (R_c).

Es un valor adimensional que relaciona el área de la cuenca y la del círculo cuya circunferencia es equivalente al perímetro de la cuenca. Una cuenca circular tiene un valor aproximado a 1 (Rais y Javed, 2014).

$$R_c = 4. \pi. \frac{A}{P^2} \quad (13)$$

Dónde:

A : Área de la cuenca (Km^2)

P : Perímetro de la cuenca (Km)

1.4.3. Parámetros de drenaje:

Una cuenca hidrográfica está caracterizada por el drenaje natural, que puede ser permanente o temporal. El flujo de las aguas superficiales o escorrentía, se analiza a través de los siguientes parámetros:

1.4.3.1. Longitud del cauce principal (L_{cp}).

Es la distancia desde el nacimiento del cauce hasta el punto de salida.

1.4.3.2. Longitud total de los cauces (L_{tc}).

Es la suma de las longitudes de todos los cauces o corrientes de agua dentro de la cuenca.

1.4.3.3. Densidad de drenaje (D_d).

Es un indicador de la forma del terreno, muestra el grado de erosión que puede ocurrir en una cuenca en función a factores geológicos, de vegetación y tipo de suelo (Fattorelli y Fernández, 2011). Está relacionado con la longitud total de los cauces y el área de drenaje:

$$D_d = \frac{L_{tc}}{A} \quad (14)$$

Dónde:

L_{tc} : Longitud total de cauces (km).

A : Área de la cuenca (km²)

Tabla 6. Valores interpretativos de la densidad de drenaje.

RANGO (km/km ²)	DRENAJE
0.1 - 1.8	Bajo
1.9 - 3.6	Moderado
3.7 - 5.7	Alto

Fuente:(Córdova, 2015)

Elaboración: El Autor.

Valores alrededor de 3.5 km/km² indican que la cuenca está bien drenada y responde rápidamente ante precipitaciones. Valores por debajo de 0.50 km/km² significan que la cuenca está mal drenada porque los suelos son impermeables o el relieve es bajo, lo que resulta en una respuesta hidrológica lenta (Linsley et al., 1977; Monsalve, 1999).

1.4.3.4. Orden de drenaje.

Es un índice que refleja el grado de ramificación de la red de drenaje en una cuenca, que fue propuesto por Horton (1945) y modificado por Strahler en (1956). El índice consiste en la asignación de un número a cada cauce principal y tributario de manera creciente. Se empieza a contar desde la parte más alta hasta el punto de salida de la cuenca. El número mayor o final señala el orden de la red de drenaje. Si el orden final de la red es alto, la cuenca tendrá una respuesta rápida ante una tormenta (Cahuana y Yugar, 2009). El valor del orden de drenaje también está influenciado por el umbral de acumulación de flujo en un MDE.

1.4.4. Parámetros de relieve.

1.4.4.1. Curva hipsométrica:

La curva hipsométrica es una representación gráfica del relieve de la cuenca y relaciona la elevación con el porcentaje del área acumulada entre las curvas de nivel (Aparicio, 1992; Horna, 2016).

A partir de esta curva se puede determinar la altura mínima, altura media, altura máxima de la cuenca como también el porcentaje de área que le corresponde cierta elevación de la cuenca. Para calcular la altura media se aplica la siguiente ecuación (Aguirre, 2007):

$$\bar{E} = \frac{H_M - H_m}{2} \quad (15)$$

Dónde:

\bar{E} : Elevación media (m.s.n.m.)

H_M : Cota máxima de la cuenca (m.s.n.m.)

H_m : Cota mínima de la cuenca (m.s.n.m.)

1.4.4.2. Curva de frecuencia de altitudes.

Esta curva es un complemento de la curva hipsométrica, que permite determinar las altitudes más frecuentes en una cuenca. Los valores del porcentaje parcial del área de la cuenca se representan en el eje de las ordenadas y las altitudes del porcentaje en las abscisas (Fallis, 2013).

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i * a_i)}{A} \quad (16)$$

Dónde:

E_m : Elevación de frecuencia media (m.s.n.m.)

e_i : Cota media entre curvas de nivel (m.s.n.m.)

a_i : Área entre cada intervalo de curvas (km²)

A : Área total de la cuenca (km²)

Además, se obtiene la altitud más frecuente (E_f) con el mayor porcentaje del área entre los rangos de elevación establecidos.

1.4.4.3. *Pendiente media de la cuenca* (S_m):

Este parámetro determina la velocidad de la escorrentía superficial e influye en el tiempo de concentración. La pendiente media se puede calcular aplicando herramientas estadísticas en el MDE, considerando la pendiente de cada píxel y el número total de píxeles que conforman la cuenca (Monsalve, 1999; Oñate-Valdivieso, 2009; Tabla 7):

$$\bar{S}_m = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i * c_i)}{C} \quad (17)$$

- \bar{S}_m : Pendiente media (%)
- e_i : Promedio del rango de pendiente (m.s.n.m.)
- c_i : Número de celdas que están dentro del rango de pendiente
- C : Total de celdas que conforman la cuenca.

Tabla 7. Clasificación de la pendiente en las cuencas hidrográficas.

PENDIENTE (%)	TIPO DE TERRENO
< 5	Plano
5 - 12	Ligeramente ondulado
12 - 18	Ondulado
18 - 24	Fuertemente ondulado
24 - 32	Escarpado
32 - 44	Fuertemente escarpado
> 44	Montañoso

Fuente:(Cahuana y Yugar, 2009)
Elaboración: El Autor.

1.4.4.4. *Pendiente media del cauce principal* (S_{cp}):

En este caso se relaciona directamente el desnivel del cauce principal con su longitud. Además, permite determinar la velocidad del flujo y la capacidad de transporte de sedimentos (Aparicio, 1992; Cahuana y Yugar, 2009).

$$S_{cp} = \frac{\Delta h}{L_{cp}} \quad (18)$$

Dónde:

Δh : Desnivel entre los extremos del cauce.

L_{cp} : Longitud del cauce principal.

1.4.4.5. Índice de Rugosidad (R):

No existen criterios uniformes que indiquen una medida de la rugosidad (Felicísimo, 1994). Sin embargo, la rugosidad de la cuenca vincula la densidad de drenaje y del relieve (Doffo y Bonorino, 2005).

$$R = (HM - Hm) * Dd \quad (19)$$

Dónde:

H_M : Elevación máxima de la cuenca (m.s.n.m.)

H_m : Elevación mínima de la cuenca (m.s.n.m.)

D_d : Densidad de drenaje.

1.5. Geometría Fractal.

1.5.1. Antecedentes.

Los objetos que observamos a nuestro alrededor presentan muchas formas que son irregulares y fragmentadas. En la naturaleza, por ejemplo, existen las nubes, montañas, ríos, arboles e incluso las hojas, que no solo presentan un grado superior de complejidad, sino que también son completamente diferentes en longitud y forma (Kanevski y Pereira, 2017). Esta variación en las formas presenta un desafío para el análisis en la geometría Euclidiana o clásica debido a su poca precisión y la necesidad de describir las formas irregulares que nos rodean (Benoit Mandelbrot, 1997; Nápoles y Palomá, 2012). Aparte de la Geometría Euclidiana, existe la Geometría Fractal, también llamada geometría moderna, la cual es una extensión a la geometría clásica, que engloba la descripción, clasificación, y análisis de sub-espacios geométricos complicados (Kanevski y Pereira, 2017). En la estructura y organización de un conjunto fractal, no es posible especificar en donde se sitúa cada punto que lo compone, pero se puede definir relaciones entre las estructuras observadas y los diferentes niveles de resolución (García Marín, 2007).

Las diferencias entre la Geometría Euclidiana y la Geometría Fractal se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Comparación de las geometrías: Euclidiana y Fractal

GEOMETRÍA EUCLIDIANA	GEOMETRÍA FRACTAL
Tradicional. (Más de 2000 años)	Moderna. (Aproximadamente desde 1980)
Simetrías simples.	Simetrías homeométricas Auto semejanza (estadística)
Objetos con magnitudes características	Irregularidad en toda magnitud
Adecuada para describir objetos fabricados por el hombre	Adecuada para describir procesos no lineales en la naturaleza
Descrita por fórmulas algebraicas.	Descrita por algoritmos recursivos complejos ideales para computadora.

Fuente: (Rivera, 1996; Vera, 2003)

Elaboración: El Autor.

De la Geometría Fractal se puede decir que es un conjunto de estructuras irregulares complejas y asimétricas de los objetos que nos rodean, descritas a través de algoritmos matemáticos o computacionales en dimensiones fraccionarias. Esta geometría, principalmente tiene la propiedad de autosimilaridad en que el todo es similar a una parte de sí mismo (Benoit Mandelbrot, 1997).

1.5.2. Introducción al concepto fractal.

El término “fractal”, fue propuesto por el matemático polaco Benoit Mandelbrot (1975) considerado como el padre de la geometría Fractal, quien derivó el nombre para esta nueva rama de la geometría del latín *fractus* (= romper / irregular; Nápoles y Palomá, 2012). Esta rama se encarga del estudio de la morfología real de los objetos analizados tal y como son. La Geometría Fractal afirma que los objetos no son tan perfectos como se muestran en la realidad, sin embargo, es una herramienta apropiada para describir objetos creados por la naturaleza, observados a diferente resolución (Benoit Mandelbrot, 1983). Mientras que la Geometría Euclidiana muestra estos objetos de la naturaleza de manera simple y no apropiada: las nubes no se muestran como esferas, las montañas no son conos, las líneas costeras no son rectas ni circulares (Rivera, 1996) .

Los postulados de la Geometría Fractal han sido utilizados en la Geografía desde hace más de cuatro décadas, fue introducido para medir la longitud de las Islas Británicas (Meseguer-Ruiz, Martín-Vide, Olcina Cantos, y Sarricolea, 2017). Consistía en una imagen satelital de Gran Bretaña, que tomada a cierta altitud se obtiene un perímetro fijo basado en la resolución de la imagen. Ahora, si la altitud del satélite disminuye, obtendremos una imagen con mayor detalle, es decir una imagen de alta resolución que permite medir el perímetro con mayor exactitud (Benoit Mandelbrot, 1983). Debido a esto, la magnitud del perímetro varía según la resolución de la imagen.

1.5.3. Características de los objetos fractales.

Para Garcia Marín (2007) y Suárez (2016), los objetos que se consideran como fractales deben cumplir con las siguientes características;

- Son conjuntos simétricos y auto semejantes que pueden presentar tres tipos:
 - *Auto similitud exacta*, el fractal es idéntico a diferentes escalas.
 - *Cuasi autosimilitud*, el fractal tiene un parecido aproximado a diferentes escalas.
 - *Auto similitud estadística*, el fractal tiene medidas numéricas o estadísticas a diferentes escalas.
- La dimensión de los objetos fractales poseen una dimensión no entera, se define con entero, y números decimales.
- Independencia de escala: Cualquiera que sea la escala del objeto, se observa el mismo nivel de rugosidad o forma.

1.5.4. Dimensión fractal.

Una definición precisa de lo que es un fractal es compleja, pero se puede expresar como un índice matemático que se calcula y permite cuantificar las características de los objetos o fenómenos fractales. Pérez (2003) lo define como la medida de complejidad o irregularidad de un objeto, que a mayor dimensión fractal más compleja parece la forma o estructura del objeto. La dimensión fractal cuantifica la relación entre la escala usada y los modelos observados a diferentes aumentos (Nápoles y Palomá, 2012).

La dimensión de un objeto es el número mínimo de coordenadas que se necesitan para especificar un punto en el espacio. En la geometría clásica o Euclidian, los objetos tienen

dimensiones enteras, por ejemplo la de una línea es uno, de un área es dos y de un volumen es tres (Camacho, 2009).

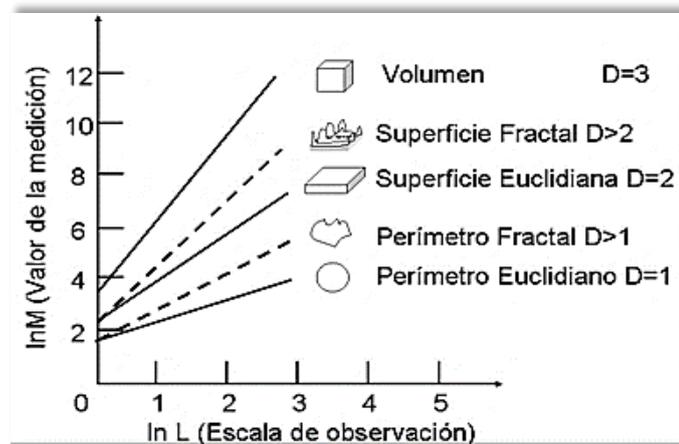


Figura 13. Representación de las dimensiones enteras y fraccionarias.
Fuente: (Camacho, 2009)
Elaboración: El Autor.

Mientras que, la dimensión fractal es la cuantificación o capacidad que tiene un objeto para rellenar el espacio que lo contiene, este espacio puede ser un plano o volumen (Camacho, 2009; Figura 14). Por ejemplo, las curvas fractales pueden serpentear dentro de un plano que casi llegan a rellenar las dos dimensiones del mismo (14 a). En la Figura (14 b) representa una línea que según la geometría euclidiana tiene dimensión uno, pero casi rellena parte del plano (14 a), es decir que su dimensión fractal también tendría que ser aproximada a dos. Por esta propiedad se asigna a las curvas dimensiones fraccionarias, números comprendidos entre uno y dos, cuanto más se serpentean las líneas, su dimensión fractal se aproximará a dos.

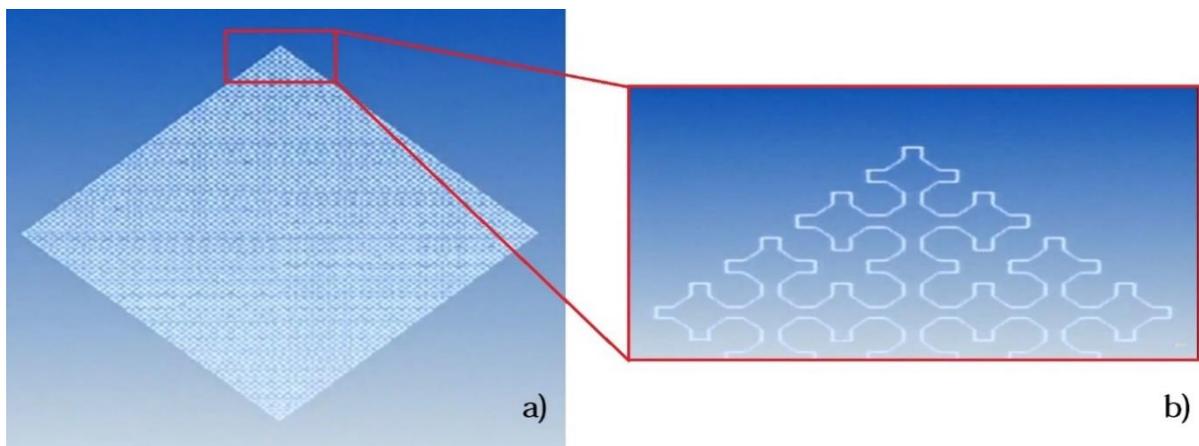


Figura 14. Dimensión fractal.
Fuente / Elaboración: El Autor.

A continuación, se expresa la dimensión fractal de un objeto mediante la siguiente fórmula (Pavón-Domínguez, Ariza-Villaverde, Rincón-Casado, Gutiérrez de Ravé, y Jiménez-Hornero, 2017):

$$1 = N r^D \implies D = \frac{\ln(N)}{\ln(1/r)} \quad (20)$$

Dónde: D es la dimensión fractal o de autosimilaridad de un objeto, N es el número de copias o unidades que forman el objeto, y (1/r) es la altura o longitud de las unidades que forman el objeto.

Como aplicación de la fórmula de dimensión fractal, tenemos el ejemplo de la curva de Van Koch (Fig. 15). Se parte de un segmento de línea, la misma que se divide en tres y el segmento del medio es remplazado por dos segmentos iguales formando parte de un triángulo equilátero y así sucesivamente (Gutiérrez, 2008). Al reemplazar en la fórmula se obtiene:

$$D = \frac{\ln(4)}{\ln(3)} = \frac{\ln(16)}{\ln(9)} = 1.26185$$

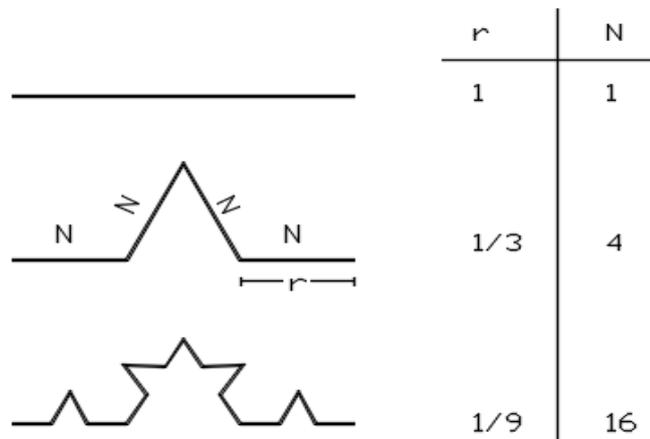


Figura 15. Dimensión fractal de la Curva de Von Koch.
Fuente / Elaboración: El Autor.

1.5.5. Clasificación de los fractales.

Los conjuntos fractales pueden clasificarse en función del procedimiento de transformación utilizado para su obtención. El proceso consiste en la obtención del fractal de una función de transformación a puntos, rectas o curvas (Camacho, 2009). Estas transformaciones pueden ser lineales (cambio de escala, idénticos en todas sus escalas hasta el infinito) o no lineales (influenciados por fenómenos al azar, donde un pequeño cambio en un parámetro produce un

gran cambio en el resultado), como también una combinación de éstas (Alonso, 2009; Pavón Rodríguez, 2012).

Según Hearn y Baker (2006), los fractales se clasifican en:

- Fractales determinísticos. Son generados por ecuaciones y formas geométricas con iteración infinita. Se dividen en uniescalar cuando cada objeto simple se divide en piezas idénticas y multiescalar cuando el objeto se divide en partes que no son idénticas (Pavón Rodríguez, 2012).
- Fractales aleatorios o también conocidos como naturales. Son objetos reales que presentan el mismo patrón a diferente escala de observación y en su construcción intervienen elementos condicionados al azar (Portilla Farfán, 2012).

1.5.6. Métodos de cálculo y algoritmos fractales.

Para la estimación de la dimensión fractal, cada método utiliza su propia base teórica, por lo que se puede obtener diferentes dimensiones para una misma función. Pavón Rodríguez (2012) manifestó que para el procedimiento general de estimación de la dimensión fractal se utilizan algoritmos, de los cuales se resumen en tres etapas:

1. Para determinar el tamaño de un objeto se usa medidas sucesivas de diferentes tamaños.
2. Las cantidades logarítmicas medidas se representan gráficamente en relación al logaritmo de los respectivos tamaños y se ajustan los valores mediante regresión lineal por el método de los mínimos cuadrados.
3. La dimensión fractal se estima como la pendiente de la recta de regresión.

A continuación, se agrupan y describen tres clases de métodos fractales:

1.5.6.1. Métodos de conteo de caja.

El proceso inicia con un mallado del objeto y se asigna un tamaño a cada una de las cajas. Finalmente se calcula la dimensión fractal mediante ajustes lineales de mínimos cuadrados (Pavón Rodríguez, 2012). Que a su vez se subdivide en los siguientes métodos

- **Box-Counting:** Propuesto por Russel et al. (1980) y muy utilizado por su sencillez. Pero la desventaja es que el resultado solo es válido para señales auto similares, porque este método es sensible al tamaño de la caja (Camacho, 2009).

$$D = - \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log[N(r)]}{\log(r)} \quad (21)$$

Donde: $N(r)$ es el número total de cajas para cubrir un objeto y (r) es la longitud unitaria de las cajas

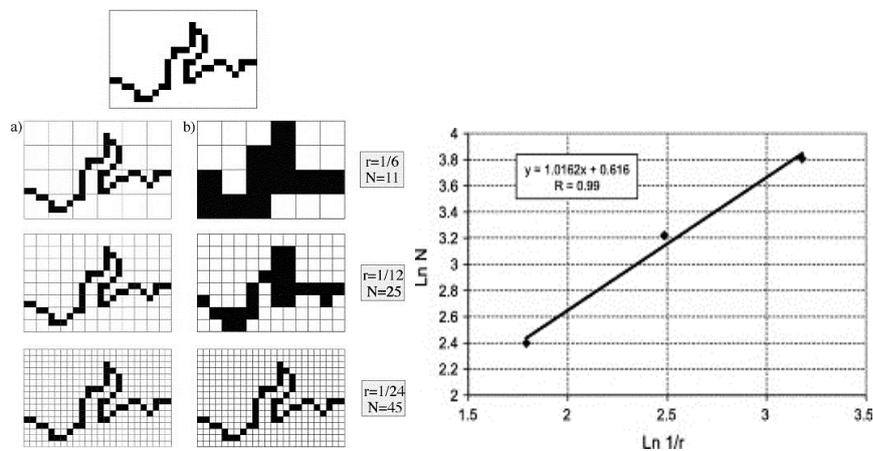


Figura 16. Diagrama y estimación de la dimensión fractal – Método Box Counting.

Fuente: (Ariza-Villaverde et al., 2013)

Elaboración: El Autor.

- **Metodo Box Counting diferencial:** Propuesto por Chaudhuri y Sarker (1995), permite trabajar con imágenes en escala de grises. Este método divide las cajas en varios tamaños (r), calcula la diferencia entre los niveles de grises mínimos y máximos en cada caja (Nr ; Fig.17). El proceso se repite para todas las cajas y la dimensión fractal se estima con la ecuación (22). Además, se establece un tamaño máximo y mínimo para las cajas que pueden resultar en una subestimación del valor real de la dimensión fractal (Gambini, 2006; Pavón Rodríguez, 2012; Suárez, 2016).

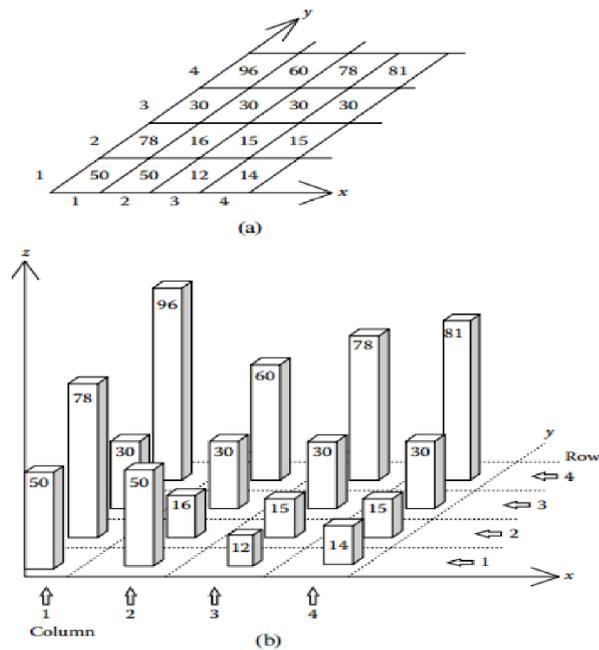


Figura 17. Imagen de Intensidad – Método Box Counting Diferencial.
 Fuente: (Suárez, 2016)
 Elaboración: El Autor.

- **Método Box Counting extendido:** Propuesto por Sanddau y Kruzz (1997), aplica un alto número de cajas sobre el objeto a analizar, y el valor máximo de las cajas analizadas es la dimensión fractal. No utiliza regresión lineal, por lo tanto la medida queda determinada por la región más compleja del objeto, pero, subestima el valor real de la dimensión fractal (Suárez, 2016).

1.5.6.2. Método de movimiento browniano:

Presenta un modelo no estacionario y auto afín (la forma original se repite en función al aumento de la resolución), se utiliza para indicadores aleatorias que describen la trayectoria del movimiento de partículas, fluctuaciones de precios, etc. (Fig.18). Se aplica principalmente para explicar el comportamiento estadístico de los mercados a través del movimiento browniano. Además tenemos los métodos de variograma y espectro de potencia que utilizan el principio browniano (Sierra, 2007).

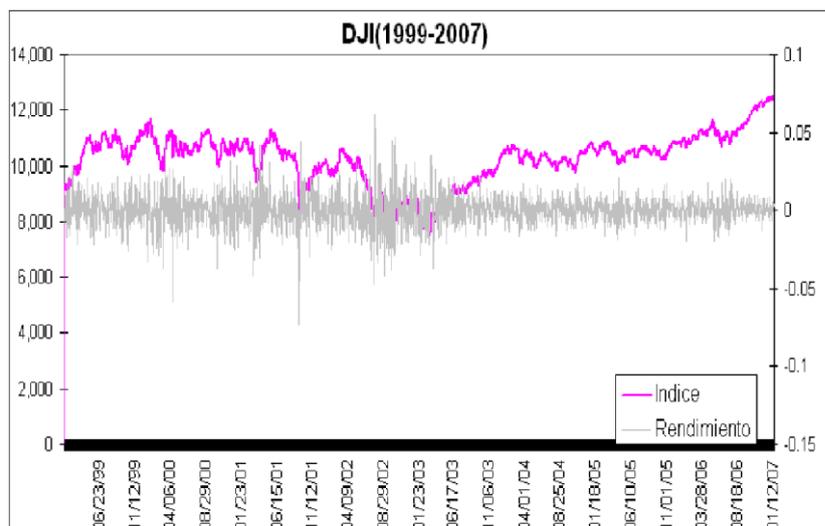


Figura 18. Método de movimiento Browniano.

Fuente: (Sierra, 2007)

Elaboración: El Autor.

1.5.7. Introducción al concepto multifractal.

El análisis fractal visto anteriormente es aplicable cuando un objeto se caracteriza por poseer la misma dimensión fractal en todas las escalas (fractal o mono fractal) como es el caso para el conjunto de Cantor, curva de Koch, etc.(Fig.15). Sin embargo, los elementos de la naturaleza no son mono fractales porque es insuficiente describirlos en una dimensión. Para solventar esta deficiencia y definir de manera precisa la complejidad de los objetos, se han desarrollado algoritmos multifractales que pueden describir un objeto mediante un conjunto de dimensiones fractales (Pavón Rodríguez, 2012; Suárez, 2016).

El concepto multifractal, contempla un número infinito de dimensiones fractales y por lo tanto puede ser más apropiado para la descripción de propiedades físicas. Un proceso multifractal se caracteriza por eventos extremos y más o menos aislados, asociados a una medida que representa un objeto o materia contenida en varias escalas de análisis (Gutiérrez, 2008; Pavón Rodríguez, 2012).

1.5.8. Algoritmos Multifractales.

A continuación, se describe los algoritmos multifractales, los cuales se pueden agrupar en dos clases:

1.5.8.1. **Métodos de conteo de caja:**

Este método utiliza el mismo principio de cálculo descrito en los fractales. Un objeto es dividido en un determinado número de cajas, asignándole a cada una de las cajas una medida normalizada de su lado y se toma en cuenta únicamente las cajas que cubren el objeto. Para analizar la distribución de densidad de puntos (pueden ser píxeles) sobre caja unitaria que describe la geometría del objeto en análisis, se toman en cuenta los siguientes algoritmos (Meseguer-Ruiz et al., 2017):

- Dimensión generalizada y espectro multifractal: Es un algoritmo que toma en cuenta el número de puntos que cubren el objeto contenidos en cada caja. El conjunto de puntos es descrito por un número infinito de dimensiones generalizadas " D_q ", o también llamadas "Dimensiones de Renyi" y por el espectro multifractal $f(\alpha)$. Estos parámetros son calculados a partir de diferentes momentos de probabilidad " q " (valores numéricos que indican la cantidad de datos que puede derivarse del estudio de los puntos en las cajas). A partir de los momentos de probabilidad se obtiene el espectro multifractal, que caracteriza cuantitativamente la variabilidad de la medida estudiada con la asimetría de derecha a izquierda, cuando los momentos son menores que cero o negativos se enfatiza el análisis de las zonas con pocos datos (Pavón Rodríguez, 2012).

- Sand-Box o método de acumulación de masa: Este algoritmo fue propuesto por (Tél, Fülöp, & Vicsek, 1989) y desarrollado (Vicsek, 1990). Es útil para el cálculo de las dimensiones fractales con momentos negativos y positivos del espectro multifractal. Se basa en el principio de conteo de cajas, pero la selección del conjunto de datos puede tener una forma circular. La ubicación de las circunferencias de similar radio (r) sobre el objeto a analizar es aleatoria, para cada circunferencia (i) se cuenta el número de píxeles o puntos $Mi(r)$ que pertenecen al objeto dentro de la circunferencia (Fig.19). La dimensión generalizada " D_q " se obtiene mediante la media $Mi(r)$ para diversos valores de (r) (Tél et al., 1989)..

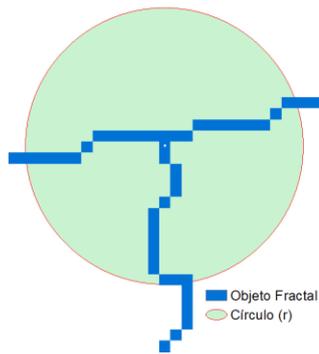


Figura 19. Multifractal Sand-box.
Fuente / Elaboración: El Autor.

La ventaja de este método es que el conteo se realiza exclusivamente a los píxeles que forman parte del objeto fractal. El algoritmo Sand-box aporta una solución para el efecto de borde y permite la construcción del espectro multifractal para valores de “ q ” tanto positivos como negativos (S. De Bartolo et al., 2004). Para el análisis, se considera el objeto fractal a la red de drenaje.

Además, investigaciones actuales presentan el algoritmo Sand-box modificado (SDW), como una reciente herramienta novedosa para el análisis multifractal de redes ponderadas, que permite obtener las dimensiones fractales generalizadas a partir de una modificación del algoritmo Sand-box original (Pavón-Domínguez et al., 2017).

- Espectro multifractal de gran desviación: Cuando el espectro multifractal se estima usando los métodos descritos anteriormente, presenta siempre forma cóncava. La ventaja de este método es que no siempre la forma del espectro será cóncava, reduciéndose así la pérdida de información. Sin embargo, requiere de una mayor computación numérica lo que le hace ser el método más difícil de aplicar en dos y tres dimensiones. Por ello se utiliza únicamente para una dimensión (Lopes y Betrouni, 2009).
- Gliding-Box: Este método consiste en que una caja se deslice sobre el objeto fractal en todas las direcciones. Para cada movimiento se realiza un conteo de los píxel o puntos que están dentro de la caja. El proceso de aumento de escala comienza con un mínimo tamaño de caja, hasta cierto tamaño menor que el área total del objeto fractal. El cálculo se realiza para un determinado tamaño de caja que contendrá un determinado número de píxeles. A partir de esto, se podrá calcular la función de partición para diferentes tamaños de cajas. A diferencia del

Box-Counting las cajas recorren la imagen realizando solapes, lo que supone que las medidas definidas en cada caja no son estadísticamente independientes. Como ventaja se tiene la obtención de un mayor número de cajas, lo que indica que los resultados son menos inciertos (Ariza Villaverde, 2013; Pavón Rodríguez, 2012).

1.5.8.2. *Método Wavelet.*

Es una herramienta matemática, que permite analizar las propiedades de escala multifractal de señales no estacionarias y de rápida transitoriedad (p.ej. acústicas, óptica, componentes espectrales) (Fig. 20). A lo largo de toda la señal, usa una caja oscilante para representar sus componentes, en el que actúa como un microscopio que revela más detalles mientras avanza de escalas mayores a menores (Gutiérrez, 2008), además tenemos los métodos basados en la transformada del módulo máximo y Wavelet discreta.

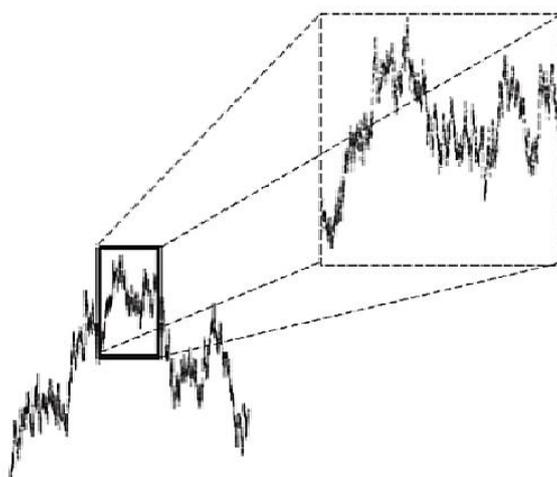


Figura 20. Método Wavelet.
Fuente: (Pirateque, 2013)
Elaboración: El Autor.

1.5.9. **Aplicaciones de la geometría fractal en la ciencia y la tecnología:**

La necesidad de describir objetos complejos ha llevado a la geometría fractal a ser aplicada y estudiada en diversos campos del conocimiento. En la medicina, por ejemplo, se utiliza la geometría fractal para diagnosticar el crecimiento y ramificación de tejidos e identificar si puede convertirse en un tumor benigno o maligno (una forma irregular del tejido o texturas, describe a una lesión maligna cuya dimensión fractal crece con la irregularidad de la forma);

para diagnosticar la osteoporosis en función a la textura del hueso; o para identificar patrones en la frecuencia cardiaca asociados también a problemas cardiaco vasculares (Azor Montoya, 2013; Muñoz, Solís, y Zamora, 2016; Silveti y Delrieux, 2010). En general, la medicina e ingeniería biomédica usan los fractales como herramienta para desarrollar modelos matemáticos que pueden ayudar a detectar de manera temprana la presencia de carcinomas (Lopes y Betrouni, 2009).

También en el campo de las finanzas se aplica la geometría fractal (fractales financieros) para analizar la tendencia del mercado, comportamiento en las series de precios, ya que la dinámica de precios no es lineal en el tiempo (Iturriaga y Jovanovich, 2014; Benôit Mandelbrot y Hudson, 2006). Como también en las telecomunicaciones, donde se utiliza antenas fractales para mejorar la señal, entre otras aplicaciones de este campo (Mercado, Iñiguez, Aldama, y Mejía, 2005; Strijhak, Redondo, y Tellez, 2017).

Además, la geometría fractal se aplica en diversas investigaciones relacionadas a la Ingeniería Civil. Sus aplicaciones son varias e incluyen: análisis de la morfología en la evolución del crecimiento urbano, caracterización de redes de transporte urbano (Ariza Villaverde, 2013; Pavón-Domínguez et al., 2017; Suárez, 2016), para caracterizar los suelos y sus propiedades (Gutierrez, 2008; Miranda, Chomiczak, y Paz, 1999; Montero, 2003). Adicional a estos campos, se usa dentro de la hidrología para: analizar las fluctuaciones entre estaciones hidrológicas (García Marín, 2007), estudiar la precisión en la generación de redes fluviales o características de las cuencas hidrográficas (Ariza-Villaverde et al., 2013; S. G. De Bartolo, Gabriele, & Gaudio, 2000; S. De Bartolo et al., 2004).

CAPÍTULO II
DATOS Y MATERIALES

2.1. Área de estudio.

El área de estudio es la cuenca hidrográfica del Río San Francisco, ubicada al Sur del Ecuador, Región 7, entre las provincias de Loja y Zamora Chinchipe. Los cauces más importantes dentro de la cuenca son: el río San Francisco (principal), las quebradas: San Ramón, Juan León, Zurita, Milagros, Navidades. En el área de estudio también se encuentra la Reserva Biológica San Francisco (RBSF); así como los poblados San Francisco y El Tambo, que pertenecen a la parroquia Sabanilla del Cantón Zamora (Fig. 21).

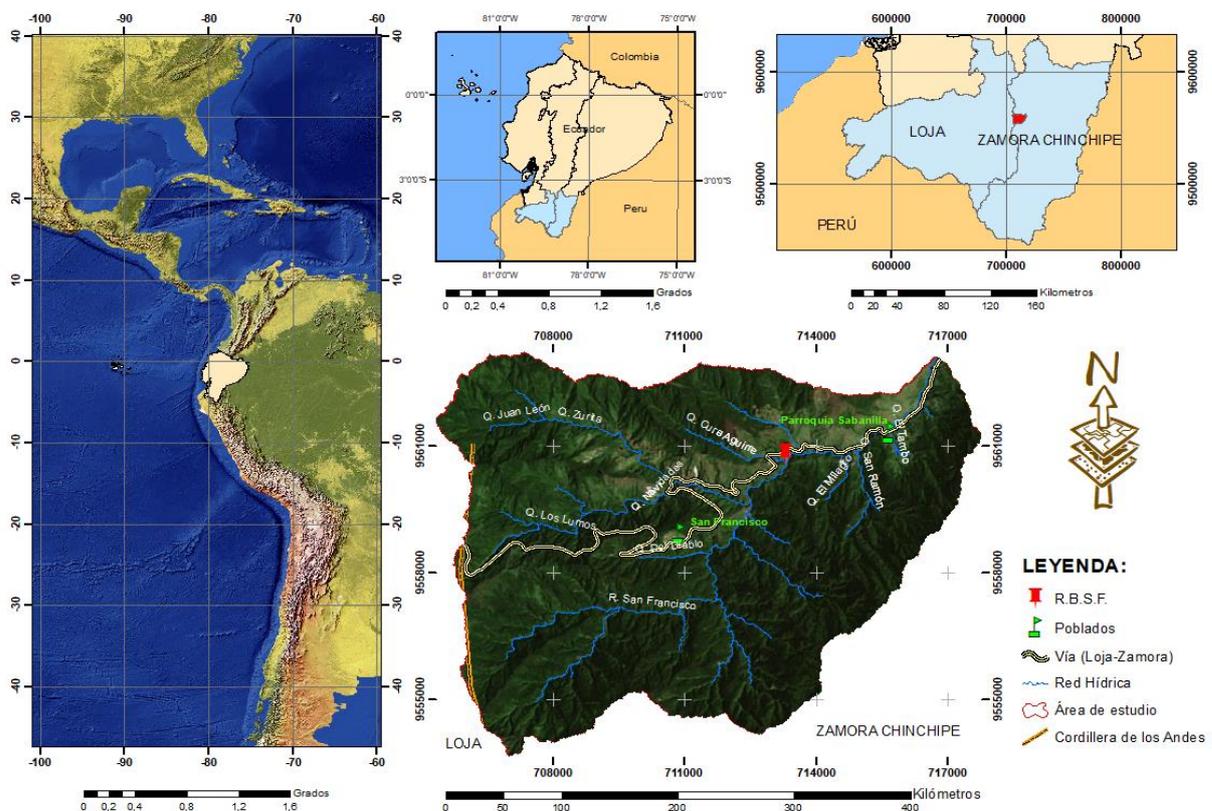


Figura 21. Área de estudio.

Fuente: Sistema Nacional de Información (SNI).

Elaboración: El Autor.

2.1.1. Ubicación Geográfica.

La zona de estudio se encuentra ubicada entre las provincias de Loja y Zamora Chinchipe. La cuenca hidrográfica es parte de la cordillera Real, con una extensión de $\sim 84 \text{ km}^2$ (Lat. $3^\circ 58' 18''$ S. Long. $79^\circ 4' 45''$ W; Silva, Álava-Núñez, Strobl, Beck, y Bendix, 2017).

La mayor parte de la cuenca pertenece a la parroquia Sabanilla del cantón Zamora, siendo este un cantón con características propias de la región amazónica, que se describen a continuación:

2.1.2. Topografía.

El área de estudio se caracteriza por tener una topografía irregular en su gran mayoría, donde la elevación oscila entre 1560 y 3230 m s.n.m. (Fig.22). Predomina un relieve escarpado y montañoso con pendientes entre el 50% y 70% (GADP-Sabanilla, 2015; Márquez et al., 2003).

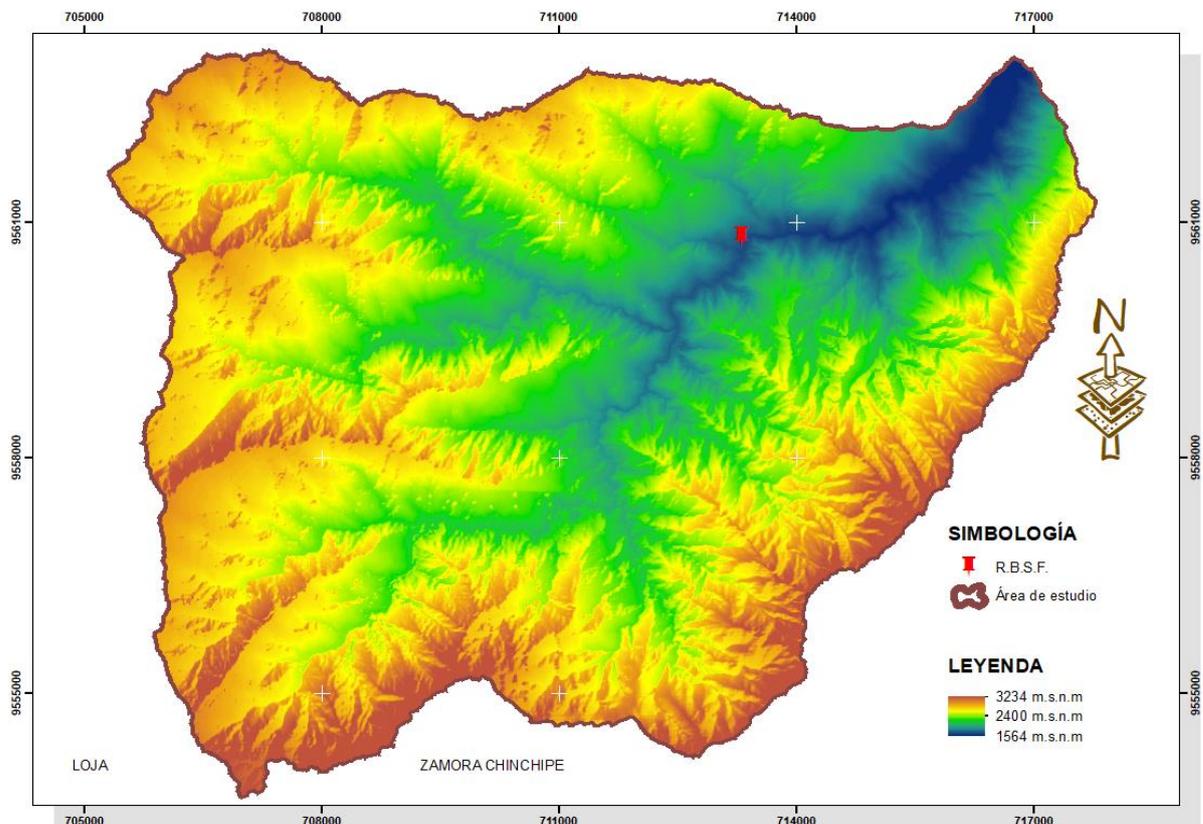


Figura 22. Topografía del área de estudio.

Fuente: Datos LiDAR
Elaboración: El Autor.

2.1.3. Clima.

En la zona de estudio, la temperatura media anual es de 15.5 °C. Presenta una variación térmica baja en la estación lluviosa debido a la presencia de nubosidad y de alta humedad del aire. Las condiciones termales más extremas se presentan en zonas donde la vegetación

tiene baja altitud como pastos o zonas cultivadas (Laderas orientadas al Sur del valle), mientras que en zonas con vegetación densa se produce un efecto regulador de la temperatura (Fries, Rollenbeck, Nauss, Peters, y Bendix, 2012).

Además, otro factor que influye en el clima de la cuenca es la topografía. La cresta de la Cordillera Oriental de los Andes constituye una clara división meteorológica (Fig. 23), principalmente de las masas de aire frío provenientes de la Amazonia que inciden en la parte alta de la cuenca (Homeier et al., 2013). De igual manera, la cuenca tiene una precipitación media anual de 2050 mm, y una evapotranspiración anual entre 919 a 1281 mm en la Estación Científica San Francisco (ECSF; Fries et al., 2012).



Figura 23. Cordillera Oriental de los Andes y área de estudio.
Fuente / Elaboración: El Autor.

2.1.4. Vegetación.

La cuenca hidrográfica, presenta dos tipos de ecosistemas, el primero es el bosque montañoso (Bosque Nativo), que cubre en su mayoría bosques naturales no perturbados y el segundo es un ecosistema antropogénico que ha sido afectado por la tala de árboles para generar tierras de pastoreo y cultivos (Pastizal; Fig. 24) (Silva, Álava-Núñez, Strobl, Beck, y Bendix, 2017).

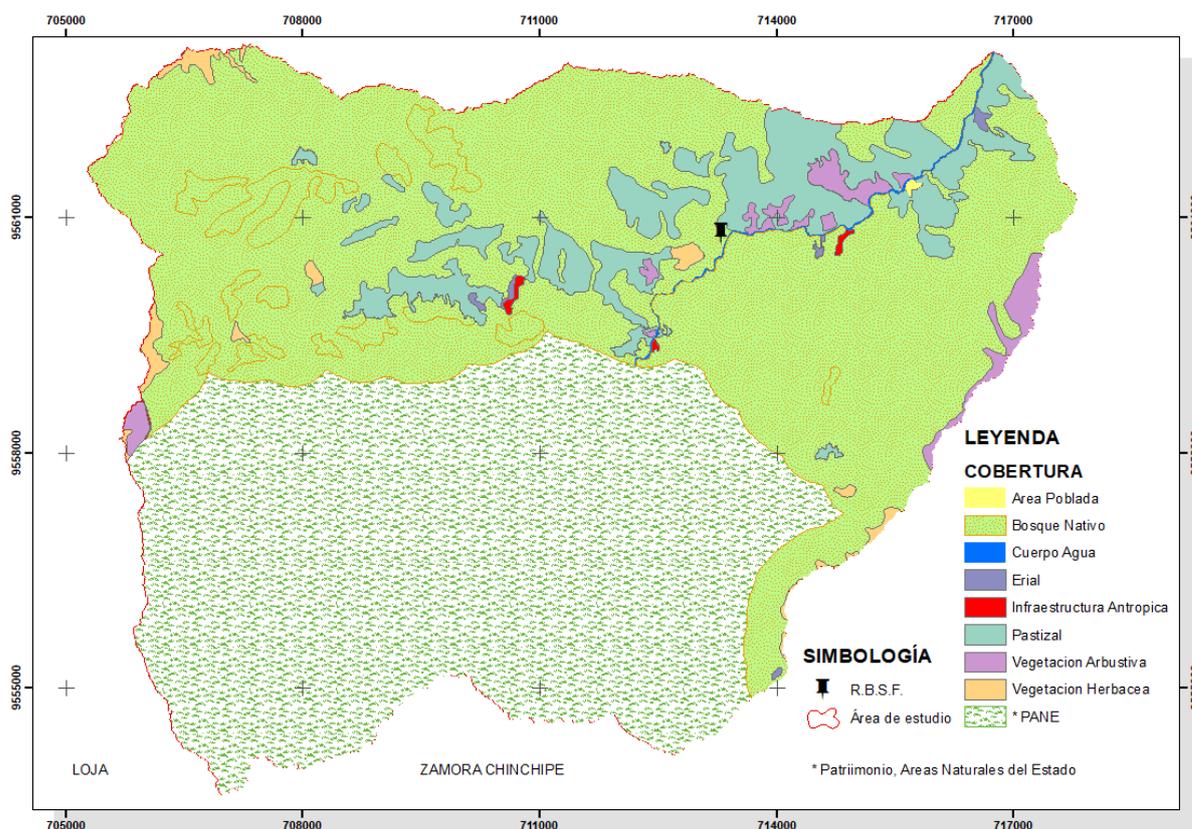


Figura 24. Vegetación del área de estudio.

Fuente: Sistema Nacional para la Administración de Tierras (SINAT).

Elaboración: El Autor.

2.1.5. Geología.

El área de estudio está asentada sobre la formación Napo y Hollin, propias de la región sur oriental de Ecuador. Estas formaciones están constituidas por complejo de Magmáticas, Granodiorita, Dioritas no deformadas y Pizarra cuarcita. Mientras que la zona subandina está ligada a los Andes, comprende sedimentos mesozoicos plegados y ligeramente metafóricos como pizarras negras, filitas calcáreas y cuarcitas, cubiertos por sedimentos terciarios de conglomerados, lutitas y areniscas (Caldwell et al., 2007; GADP-Sabanilla, 2015).

2.1.6. Hidrografía.

La región de estudio recibe las aguas de la vertiente oriental de los Andes, forma parte de la subcuenca del Río Zamora (ver Figura 25) que pertenece al sistema hidrográfico del Río Santiago y desemboca en el Río Amazonas.

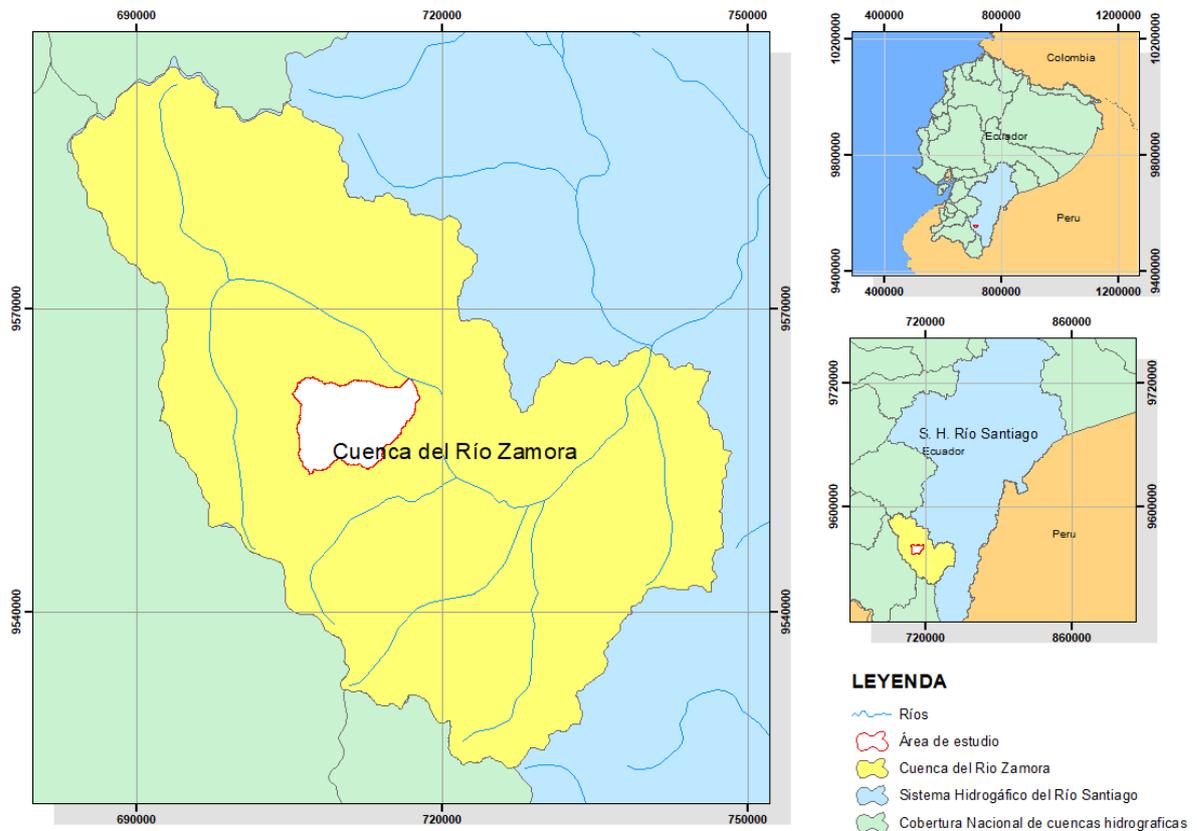


Figura 25. Sistema Hidrográfico del Río Santiago.
 Fuente: Sistema Nacional para la Administración de Tierras (SINAT).
 Elaboración: El Autor.

2.2. Obtención y características de los datos.

2.2.1. LiDAR.

Los datos LiDAR se obtuvieron del Proyecto Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS). El proyecto de captura de datos fue desarrollado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería, Acuacultura y Pesca.

El conjunto de datos tiene un formato .LAS, constituido por 29 archivos que cubren la zona de estudio.

2.2.2. MDE: ASTER, SRTM, ALOS PALSAR.

Los MDE fueron obtenidos de fuentes disponibles de libre acceso en internet mediante previo registro. Los MDE del satélite ASTER y del SRTM de la cuenca en estudio, tienen una

resolución espacial de 30 m x 30 m, los cuales fueron descargados de la página web “Earth Explorer” (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), administrado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

El MDE del Satélite ALOS con resolución espacial de 12.5 m x 12.5 m, fue obtenido de la página web “Alaska Satellite Facility’s”, (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>).

Además, de las fuentes antes mencionadas, también se pueden obtener MDE a partir de: TerraSAR-X WorldDEM, GMTED2010, GTOPO30, AW3D30 DSM v1_v1.1, SRTM v1-v2-v4,1. Pero, para el presente estudio no se consideraron, porque tienen un costo y/o su baja resolución.

Tabla 9. Resumen de los MDE satelitales utilizados.

DEM	FUENTE	MÁX. RESOLUCIÓN ESPACIAL
ASTER	https://reverb.echo.nasa.gov/reverb	30 m
	http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/	
SRTM	http://earthexplorer.usgs.gov/	30 m
	http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp	
ALOS PALSAR	https://vertex.daac.asf.alaska.edu/?	12,5 m

Fuente / Elaboración: El Autor.

2.3. Software.

2.3.1. FUSION.

FUSION 3.6, es un software libre desarrollado por el departamento de Agricultura y Servicio Forestal de los Estado Unidos, orientado a procesar información de datos LiDAR para aplicaciones forestales. El programa está compuesto por tres sistemas diferentes: “FUSION” es la interfaz de usuario, conformado de un panel de control y un display 2D que muestra los datos cargados al programa. “LiDAR Data Viewer” (LDV) permite la visualización interactiva en 3D de los datos. Además, la biblioteca de comandos son programas independientes que

se ejecutan sobre MS-Dos, y permiten procesar un alto volumen de datos LiDAR (Gil-Yepes, Ruiz, Fernández-Sarría, y Hermosilla, 2012).

FUSION posee herramientas para el cálculo estadístico y la generación de MDT. McGaughey (2016), clasifica los datos de entrada en seis categorías:

- Imágenes: Cualquier Imagen georreferenciada, generalmente ortofotos.
- Datos Primarios (Raw Data): Datos de retorno LiDAR o puntos XYZ.
- Puntos de Interés (POI): Cualquier capa de puntos, líneas o polígonos.
- Puntos de acceso: Marcadores explícitos que representen referencias a ubicaciones específicas.
- Árboles: Permiten ingresar al programa datos medidos en el campo que representan árboles individuales.
- Modelos de Superficie: También es posible cargar al programa, una superficie de suelo desnudo o cubierto.

2.3.2. Quantum GIS (QGIS).

QGIS 2.18, es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto, que ofrece grandes bondades para visualizar, editar y analizar datos espaciales. La interfaz de QGIS es amigable y fácil de usar. Además, el software cuenta con una amplia lista de complementos, muy útil para el procesamiento de datos LiDAR.

2.3.3. ArcGIS 10.4.

Es un conjunto de aplicaciones SIG. Este software permite realizar análisis espaciales, tratamiento de datos y aplicaciones cartográficas a través de sus herramientas avanzadas. Se usó con una licencia trial que dura 60 días.

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA

3.1. Procesamiento de los datos LiDAR.

Antes de explicar el procesamiento de los datos LiDAR, es necesario entender cómo se obtienen los datos en crudo. En la planificación del vuelo, se definen los parámetros necesarios (altura, orientación, velocidad, rutas) para realizar el levantamiento de información de la zona en análisis. A través de las rutas de vuelo se recolecta la información en forma de fajas o tiras, cada faja contiene una parte de la información total recolectada. Debido a los parámetros y características variables del vuelo, es necesario realizar una homogenización de los datos obtenidos en el recorrido del vuelo. Esta homogenización consiste en la unión de todas las fajas y la representación en el mismo sistema de referencia. Este proceso es complejo, porque en el solape de las fajas pueden existir errores como aparición de escalones, zanjas o crestas, e inclusive errores en la clasificación de puntos que se ve reflejado en el modelo final (Ibañez Martínez, 2008).

Después de la homogenización, se tienen las coordenadas definitivas de cada punto en [X, Y, Z] para toda el área de estudio en formato binario .LAS (Log ASCII Standard), es decir una nube de puntos tridimensionales georreferenciados (Lanig y Zipf, 2009). Es así como se obtienen los datos LiDAR en crudo.

El procesamiento de datos LiDAR, inicia con un filtrado de puntos que se ejecutan en dos fases. La primera fase consiste en extraer los puntos que están ubicados de manera anómala entre el sensor y el primer retorno, también conocidos como Outliers. Los Outliers, por lo general, son los retornos que han provocado aves, arena o algún objeto disperso en el aire, pero también datos defectuosos con valores por debajo de la superficie, que pueden generarse por la intensidad del retorno sobre superficies específicas (agua, vidrio). En la fase dos, se aplica otro filtrado con la finalidad de obtener puntos pertenecientes solo al terreno (puntos del último retorno), es decir se eliminan los retornos que fueron interceptados por objetos terrestres, como la vegetación, cubiertas de edificios, vehículos y otros objetos naturales o artificiales que están sobre el terreno (Sharma, Paige, y Miller, 2010; Tobergte y Curtis, 2013a).

Durante los procesos de filtrado, se realiza el manejo del conjunto de puntos en el formato .LAS. Las categorías o clasificación de los puntos de datos LiDAR, son estándar y están establecidas por la Sociedad Americana de fotogrametría y Percepción Remota/Teledetección (ASPRS, 2013). A continuación, se presenta una lista completa de la clasificación de puntos (Tabla 10), considerando los valores de 1,2,7,9,10,17,18 como información necesaria para la generación de un MDE (Campoverde y Satián, 2015).

Tabla 10. Clasificación de puntos LiDAR

VALOR	DESCRIPCIÓN
0	Creados, nunca clasificados
1	Sin clasificar
2	Suelo
3	Vegetación baja
4	Vegetación media
5	Vegetación alta
6	Edificios
7	Puntos bajos (ruidos)
8	Nube de puntos
9	Agua
10	Vía de tren
11	Vía
12	Puntos solapados
13	Alambre de protección
14	Alambre conductor de fase
15	Torre de transmisión
16	Alambre conector de estructuras
17	Puente
18	Puntos altos (Ruido)
19-39	Reservado para ASPRS
40	Punto batimétrico
41	Superficie de agua
42	Superficie derivada de agua
43	Objetos sumergidos
44	Objetos IOH-57
45	Sin fondo en el punto batimétrico
46-255	Reservado para ASPRS

Fuente: (Campoverde y Satián, 2015)

Elaboración: El Autor.

Los actuales avances en el proceso de filtrado de datos LiDAR han permitido mejorar los algoritmos matemáticos automatizados que puedan generar filtros más rápidos y eficaces. Autores como Estornell (2011), Montealegre Lamelas, y De la Riva (2013), Parra Artero (2013) Martínez Blanco (2016) clasifican a los filtros en las siguientes categorías:

- a) Interpolación: Compara las elevaciones de los puntos a partir de métodos de interpolación en procesos iterativos.
- b) Contornos Activos. Representa un contorno tridimensional que funciona como una red para eliminar puntos no pertenecientes al suelo.
- c) Densificación progresiva o basados en TIN. Realiza una interpolación solo con puntos de cota mínima, luego busca nuevos puntos basándose en la distancia punto-superficie del triángulo y ángulo del punto-vértice cercano. Este algoritmo ofrece buenos resultados en superficies con discontinuidades como es en las zonas urbanas.
- d) Basados en segmentación. Los puntos se agrupan en función a las características geométricas para delinear un objeto. Consiste en dos fases: primero la generación y unión de segmentos individuales de características similares, segundo la clasificación. El proceso se aplica en zonas con gran influencia humana, es decir, en zonas no boscosas.
- e) Basados en superficies. Utiliza áreas construidas por interpolación y asume que todos los puntos son de suelo desnudo. A través de iteraciones elimina zonas que no se ajustan a la superficie. Ofrece buenos resultados en zonas boscosas y en áreas urbanas. Incluido en este filtro está el algoritmo de predicción lineal de Kraus y Pfeifer (1998), lo cual también es integrado al programa FUSION, en la extensión "GroundFilter". La Tabla 11 presenta algoritmos adicionales basados en superficies.

Tabla 11. Resumen: Filtros de puntos LiDAR basados en superficies

FILTROS EN SUPERFICIES	AUTOR (ES)	AÑO
Linear prediction (Robust interpolation)	K.Kraus, N. Pfeifer, C. Briese	1998
Active contours (Hierarchical interpolation)	Pfeifer et. al.	2001
Snake-approach (Hierarchical interpolation)	Elmqvist	2001
Spline surface interpolation	Broveli et. al.	2004
Perform Height filtering	Strentker, Glann	2006
Multiscale Hermite Transform (MHT)	Silván-Cárdenas, Wang	2006
Multiscale Curvature Classification (MCC)	Evans, Hudak	2007
Multiscale Terrain Filtering (MTF; layering)	Chen et. al.	2012
Multiresolution Hierarchical Classification (MHC)	Mongus et. al.	2012
with Thin Plate Spline (TPS)	Chen et. al.	2013
Thin Plate Spline-Based Feature-Preserving (TPS-F)	Chen et. al.	2015

Fuente: (Martínez Blanco, 2016)

Elaboración: El Autor.

f) *Morfológicos*. Describe estructuras geométricas relacionadas con la erosión y dilatación. La dilatación es el valor máximo y la erosión como valor mínimo para realizar una búsqueda de valores dentro de una ventana determinada. Se han desarrollado mejoras con el fin de obtener un filtro morfológico progresivo que incorpora un umbral que marca la diferencia de altura entre el terreno y los objetos de la superficie. A continuación, se detallan algunos filtros morfológicos (Tabla 12).

Tabla 12. Resumen: Filtros morfológicos de puntos LiDAR

FILTROS MORFOLÓGICOS	AUTOR (ES)	AÑO
Based on profiles	J. Lindenberger	1993
Multiple structure elements	Kilian et al	1996
Hierarchical surface regularization	K.Kraus, N. Pfeifer, C. Briese	1998
Dual Rank Filter	Lohmann et. al.	2000
Maximum Local Slope (MLS)	Vosselman	2001
Adaptive Slope based filter (variant of MLS)	Sithole, Vosselman	2001
Modified Slope bases filter (Local Lineal Regression)	Roggero	2001
Method similar to Kriging (weights functions)	Kraus and Pfeifer	2001
Modified Block Minimum (variant of morphological filter by Killian et. al.)	Wack, Wimmer	2002
(variant of morphological filter by Killian et. al.)	Masaharu, Ohtsubo	2002
Progressive morphological filter (PMF)	Zhang et. al.	2003
Elevation Threshold with Expanding Window (ETEWE)	Zhang, Whitman	2005
Geodesic dilation	Arefi, Hahn	2005
Trend surfaces from first and last return	Zaksek, Pfeifer	2006
Polynomial fitting filters	Zhang and Cui	2007
Adaptation of polynomial fitting filters	Chen et. al.	2017
Simple MoRpholocial Filter (SMR)	Pingel	2013
Multi-gradient analysis	Li	2013

Fuente: (Martínez Blanco, 2016)

Elaboración: El Autor.

Para obtener un filtrado óptimo se puede realizar una combinación de técnicas, es decir armar filtros híbridos. A través de la combinación de técnicas, muchos softwares generan buenos resultados respecto al filtrado o la visualización de datos LiDAR: (p.ej ArcGIS, Global Mapper TerraScan, Microstation, ENVI, ERDAS o de libre acceso FUSION, GRASS, FrugoViewer, Dielmo Open LiDAR, MCC-LiDAR, ALDPAT y LASTools; Mosquera, 2017).

En zonas similares a la presente área de estudio se aplicaron los algoritmos de Kraus y Pfeifer, (Montealegre et al., 2013; Sellers et al., 2015), obteniendo buenos resultados. Después de la eliminación y el filtrado (Fase 2), se tiene solo los puntos que pertenecen al terreno, de los cuales se puede generar un MDT, mediante la interpolación de los puntos. Un MDT representa una superficie sin vegetación, sin edificaciones y sin objetos que sobresalen del terreno.

Para obtener el MDE, se interpolan los puntos que quedan de los filtros. El proceso de interpolación permite calcular el valor de una variable en una posición de espacio no conocido, aplicando los valores conocidos de esa variable en posiciones vecinas o cercanas. Existen dos tipos de interpolaciones:

- Determinístico: está basado en la interacción de variables independientes que determinan el comportamiento de una o varias variables dependientes. Existen diferentes técnicas, basado en fórmulas matemáticas, como los Polígonos de Thiessen, Triangulación, Distancia Inversa, Superficie de mínima curvatura o Spline (Duque Matínez, 2015).
- Estocásticos: representan fenómenos compuestos por eventos predecibles y aleatorios, basados en modelos estadísticos. Este grupo incluye los método Kriging, Variograma Experimental, Variogramas teóricos, Estimación Kriging Ordinario (Chen, Bingbo, y Devereux, 2017; Duque Matínez, 2015).

El principio general en la interpolación de una variable, es estimar su valor mediante la agrupación de puntos vecinos o cercanos al punto de interés. Se selecciona aleatoriamente un punto de interés y se busca los demás puntos adyacentes alrededor del punto a una distancia cercana para estimar su valor o dar forma a un objeto (Jie, Haiquan, Ming, y Guoning, 2006). Después se selecciona otro punto, y así sucesivamente, hasta cubrir el área de interés.

Para crear un ráster a partir de los datos LiDAR filtrados, se realiza una interpolación. En FUSION, se aplica dos comandos: "GridSurfaceCreate" que calcula la elevación media de todos los puntos que se encuentran dentro de una celda y "TIN Surface Create" que genera una estructura de triángulos, de forma que mide tres puntos más cercanos (Arranz Justel, Ormeño Villajos, y Vicent García, 2012; McGaughey, 2015).

En resumen, el procesamiento de datos LiDAR para generar un MDE, se basa en los siguientes pasos (Wang y Tseng, 2010):

1. *Eliminación de errores*: Borrar los puntos denominados outliers.
2. *Filtrado de puntos*: Clasificar los puntos de terreno y de la superficie en análisis.
3. *Interpolación, reorganización o re-muestreo*: Aplicar algún método de filtrado para generar una malla o grid.
4. *Generación de MDE*: Crear una superficie a partir de los puntos clasificados anteriormente. Mediante los puntos de terreno se genera un MDT y con los puntos que sobresalen del terreno un MDS.

Para aplicar este procedimiento, en el presente trabajo de investigación se usa el programa de libre acceso "FUSION 3.6". Los pasos individuales, se detallan a continuación:

3.1.1. Generación de los MDT mediante FUSION:

Se carga al programa los archivos necesarios, como son: los datos LiDAR, en formato .Las, imágenes vectoriales del área de estudio en formato shape, además una imagen ráster georreferenciada que también puede ser generada a partir de la intensidad de los pulsos.

Mediante la visualización de los datos LiDAR, se determina la presencia de objetos o puntos aislados que han sido interceptados por los pulsos entre el sensor y el terreno (outliers y puntos sobre el terreno). Como se explicó antes, se eliminan los outliers y se aplican los filtros para obtener solo la información de los puntos pertenecientes al terreno desnudo. FUSION, ejecuta las funciones de filtro mediante líneas de comando en MS Dos, a modo de scripts, lo que hace que el manejo del programa sea complejo al inicio. Sin embargo, las funciones incluidas en el programa son bastante potentes y permiten enlazar o crear secuencias de varios comandos en formato .bat, (Cabrera Guarinos, 2013; Gil-Yepes et al., 2012; Sellers et al., 2015; Torre Tojal, 2016).

Cada comando presenta su propia estructura (sintaxis), que describe la manera de procesar los datos LiDAR. La estructura empieza con la ubicación (carpeta de instalación) y nombre del comando "*Herramienta FUSION*", luego, una serie de "*switches*" donde se introducen modificaciones adicionales que permiten controlar y modificar las tareas dentro del comando. Además, se ingresa la dirección del *archivo de entrada y salida*, en algunos casos es necesario definir *parámetros* para cada comando (Martin-García et al., 2017). A continuación, se describen los comandos utilizados.

➤ “Catalog”.

Permite explorar y describir las características del conjunto de datos LiDAR. El resultado es una Tabla que describe los valores de la clasificación de puntos, elevación, densidad de retorno y una imagen con la densidad de puntos sobre el área de cobertura (McGaughey, 2015). Además, se genera un archivo con extensión html que se puede abrir en cualquier navegador de internet.

Sintaxis del código “Catalog”



El parámetro “switch” utilizado en el comando es el siguiente:

/switches:

/Density:área,min,max: Crea una imagen ráster (píxeles) con áreas de densidades de puntos, p. ej píxeles rojos es mínima, píxeles azules es máxima, y píxeles verdes muestran la densidad entre los dos extremos (*min, máx.*).

➤ “FilterData”

Este filtro detecta y elimina outliers, mediante el cálculo de la elevación media y la desviación estándar en base de las elevaciones medidas en cada celda de la cuadrícula de comparación (McGaughey, 2015).

Sintaxis del código “FilterData”.



Características de los parámetros utilizados:

/switches:

Outlier 2: Permite una extracción robusta de los retornos u outliers.

Parámetros:

Tamaño de la ventana: Valor numérico para calcular la desviación estándar de las elevaciones. (150).

➤ “Ground Filter”

Es un algoritmo que se basa en un filtro adaptativo morfológico de predicción lineal (Kraus y Pfeifer, 1998). Este proceso es iterativo con una precisión individual para cada medición. Primero se calcula una superficie con pesos iguales para todos los puntos, obteniendo un modelo intermedio para comparar entre el terreno y la vegetación. Los puntos que están por debajo de la media se consideran como terreno, tomando en cuenta cierta tolerancia (Gil-Yepes et al., 2012; McGaughey, 2015). El algoritmo aplica la siguiente fórmula:

$$P_i = \begin{cases} 1 & \rightsquigarrow v_i \leq g \\ \frac{1}{1 + [a (v_i - g)^b]} & \rightsquigarrow g < v_i \leq g + w \\ 0 & \rightsquigarrow yg + w < v_i \end{cases} \quad (22)$$

Dónde:

a y b: Valores que determinan los pasos o distancias de la función peso, generalmente a=1 y b=4.

g: Determina a que puntos se asigna el valor máximo de 1. Los puntos que están debajo de la superficie en un valor superior a 1, se les asigna el valor de 1.

w: Establece una altura máxima para los puntos que tengan una influencia sobre la superficie intermedia. Mientras que los puntos sobre el nivel definido por (*g+w*) se les asigna un valor de 0.

v_i: puntos residuales del ajuste.

Sintaxis del código “Ground Filter”:



Características de los parámetros utilizados:

/switches:

/diagnostics: Muestra la información durante el proceso.

/wparam:2 Modifica el valor del parámetro W.
 /median:5 Aplica un filtro medio para el modelo en una ventana de (#x#).
 /iterations:6 Número de iteraciones para el filtrado.
 /finalsmooth Aplica un suavizado a la última iteración.

Tamaño de celda: Valor para las superficies intermedias usada para las iteraciones. Este tamaño no tiene influencia para la resolución de la superficie del MDT final.

Luego, se realiza la interpolación a partir de puntos clasificados como terreno, aplicándose cualquiera de los siguientes comandos:

➤ “Grid Surface Create”

Crea una malla regular en formato ráster usando la elevación media del conjunto de puntos clasificados dentro de la celda. En el caso que la celda no disponga de ningún punto, esta malla se genera por interpolación a partir de las celdas vecinas. Generalmente se usa para datos filtrados de terreno desnudo (McGaughey, 2015).

Sintaxis del código “Grid Surface Create”:



Características de los parámetros utilizados:

/switches:

/median:3 Aplica un filtro mediano al modelo usando una ventana de #x# de la celda vecina.

Parámetros:

Tamaño de celda: # Tamaño del píxel de salida (5,12.5,30,50,75) m.
Unidades XY: M Unidad de medida de las coordenadas, M=metros.
Unidades Z: M Unidades de medida para la elevación, M=m.s.n.m.
Coordsys: 1 Sistema de coordenadas para la superficie, 1=UTM.
Zona: 17 Zona de coordenadas para la superficie.
Horizdatum: 0 Datum horizontal para la superficie: 0 = Desconocido.
Vertdatum: 0 Datum vertical para la superficie: 0 = Desconocido.

Finalmente, el modelo creado tiene una extensión .dtm. Para analizar y modificar el modelo con cualquier software SIG, se lo convierte al formato ASCII Grid file (FUSION: *Tools >> Terrain Model >> Export Model.*). También existe la posibilidad de exportar el archivo en formato .tif.

3.2. Pre-procesamiento de los MDE satelitales.

El pre procesamiento es necesario para corregir errores en los modelos, lo cual se aplica especialmente para los MDE SRTM (Castillo, 2015). Estos MDE contienen celdas o zonas sin valores, que deben ser rellenados aplicando métodos de interpolación. En el presente trabajo se utilizaron las siguientes funciones incluidas en el programa ArcGis:

- Raster Calculator. Con la Expresión “IsNull”, se puede identificar celdas que no tengan valores, clasificadas con el número 1 y las que tiene valores con el número 0.
- Focal Statistics. Se aplica estadísticas focalizadas al ráster clasificado con 0 y 1. El proceso consiste en asignar un valor a las celdas sin datos en función a los valores de las celdas vecinas o cercanas. El método de relleno óptimo depende de la forma y tamaño de las celdas vacías (Olaya, 2014). Se utilizó una estadística focal circular con un tamaño de celda de 10 m (Fig. 26).

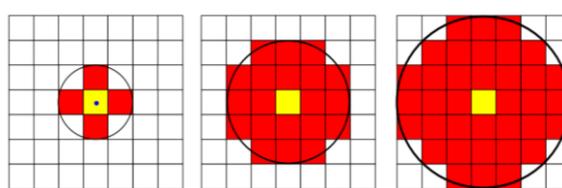


Figura 26. Estadísticas focales.
Fuente / Elaboración: El Autor.

Para completar el relleno de datos, se utiliza la expresión condicional “Con”, dentro de la función en *Raster Calculator*. Esta función permite reemplazar las zonas que no contienen valores con las obtenidas de las estadísticas focales, mientras que las demás celdas se mantienen de acuerdo al MDE original.

3.3. Procesamiento de los MDE corregidos.

El procesamiento empieza con la unión de los MDE para cubrir toda el área de estudio, definir la información del sistema de coordenadas y finalmente se generan los MDE con un tamaño de píxel o resolución uniforme.

Los MDE: ASTER, SRTM y ALOS, se pueden descargar libremente, pero para obtener una resolución idéntica o uniforme se debe aplicar la siguiente metodología:

En el caso de los MDE: SRTM y ASTER, en esta investigación se componen por 4 MDE necesarios para cubrir toda el área de estudio. Debido a esto, es necesario integrar los 4 MDE en un solo archivo, abarcando así la totalidad de la cuenca. Para este proceso se utilizó la función *Mosaic To New Raster* del programa ArcGis. Luego, se realizó la transformación de coordenadas geográficas a proyectadas con la función *Project Raster* de ArcGis. En este estudio se trabajó con coordenadas UTM, WGS198, Zona 17S (Fig. 27).

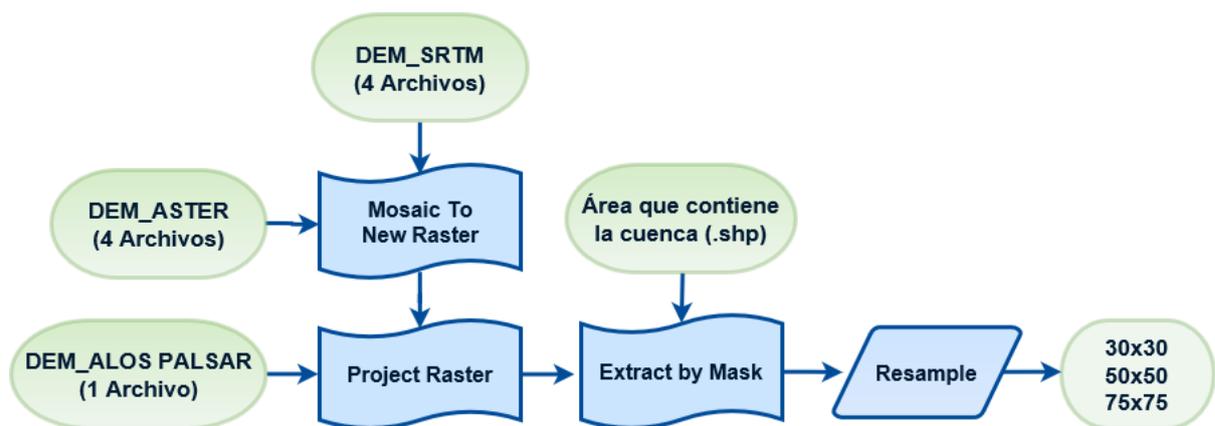


Figura 27. Procesamiento de los MDE.

Fuente / Elaboración: El Autor.

Con el fin de procesar menos cantidad de datos, y agilizar la operación computacional se reduce el tamaño del ráster para los MDE de ASTER, SRTM y ALOS PALSAR a un área que contiene la cuenca en estudio. Para esto se utilizó la función *Extract by Mask* que mediante una máscara rectangular “Área que contiene la cuenca” se recortó el ráster.

Finalmente, se generó los diferentes MDE del área de estudio en resoluciones de 30 m, 50 m y 75 m, aplicando el método de remuestreo “Vecino Cercano”, porque este proceso genera una apariencia más suave, la cual es ideal para el cálculo hidrológico (Wu, Li, y Huang, 2008).

Adicionalmente, se guardó un MDE de ALOS PALSAR en la resolución de 12.5 m x 12.5 m, lo cual es la resolución original de esta fuente.

En resumen, los MDE generados tienen las siguientes resoluciones o tamaños de píxel (Tabla 13):

Tabla 13. Tamaño del píxel re muestreado

MDE	TAMAÑO DEL PÍXEL (m)
ASTER	30, 50, 75
SRTM	
ALOS PALSAR	12.5, 30, 50, 75
LIDAR	

Fuente / Elaboración: El Autor.

3.4. Delimitación de la cuenca hidrográfica.

Una vez realizado el procesamiento necesario para corregir y generar los MDE en las resoluciones mostradas en la Tabla 13 (MDE_Corregido). Se delimitó la cuenca utilizando herramientas SIG.

Con la delimitación de la cuenca hidrográfica, se calcula los parámetros morfométricos. Además, para la generación de las redes de drenaje, se establece el umbral de acumulación. El valor del umbral se lo calculó a partir del área delimitada, para ello se aplicó las siguientes herramientas:

➤ Fill (Rellenar).

Esta herramienta permite eliminar las imperfecciones dentro del MDE. Las imperfecciones se presentan cuando todas las celdas vecinas son más altas o bajas que la celda de procesamiento, por lo tanto no hay una ruta de flujo descendente a una celda vecina, esto se produce por problemas en la generación del MDE o debido a componentes reales del terreno (Wu et al., 2008). La herramienta asigna un valor adecuado a las celdas afectadas, mediante los valores de las celdas vecinas (Fig. 28).

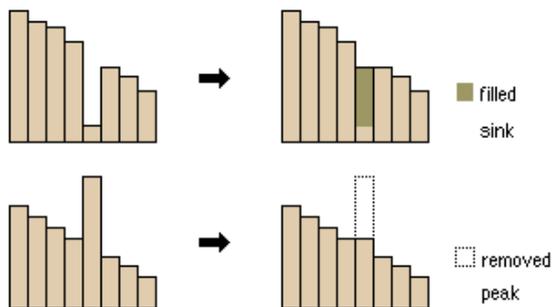


Figura 28. Proceso de corrección de errores en sumideros o picos.
 Fuente: (ESRI, 2016c)
 Elaboración: El Autor.

➤ Flow Direction (Dirección del flujo).

Esta herramienta permite definir la dirección de la red hídrica en una celda. Para Zhao, Gao, Tian, y Tian (2009), indican que las direcciones donde puede ir el flujo se determina en relación a las ocho celdas adyacentes, denominado D8 (Fig.29). Además, Olaya (2014) recomienda el método D8 para cuencas, porque permite generar un ráster que incluye dos valores:

- ✓ Un valor, para las celdas que forman parte del píxel vertiente.
- ✓ Un valor, para los píxeles que no forman parte de la línea de dirección de flujo.

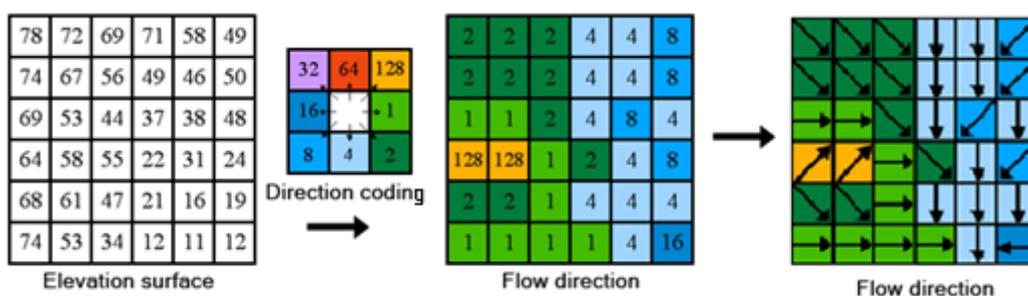


Figura 29. Proceso de dirección de flujo.
 Fuente: (ESRI, 2016b)
 Elaboración: El Autor.

➤ Flow Accumulation (Acumulación del flujo).

Esta herramienta, crea un ráster a partir de la dirección del flujo que determina la acumulación (Castillo, 2015). La acumulación de flujo se establece en función a la suma de las direcciones de flujo del conjunto de todas las celdas que drenan a una celda en particular. Por lo tanto, en la parte alta de una cuenca la acumulación

del flujo será cero. Además Bazílio, Souza, Wrublack, Mercante, y Vilas Boas (2013), indican que la acumulación de flujo proporciona una nueva matriz con valores específicos de acumulación para cada píxel (Fig. 30).

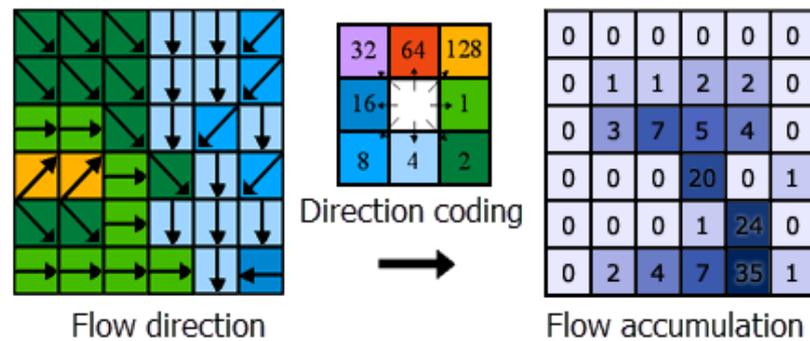


Figura 30. Proceso de acumulación de flujo.
Fuente: (ESRI, 2016a)
Elaboración: El Autor.

A partir de la acumulación del flujo se obtiene el umbral que permite identificar los cursos de agua de acuerdo al tamaño de la cuenca. El curso se establece mediante un valor numérico, en función del número de píxeles donde se genera un cauce (Martínez, 2007).

Un valor bajo del umbral, genera redes de drenaje con elementos excesivos, mientras que un valor alto genera cauces poco representativos. Sin embargo es difícil determinar un valor óptimo del umbral en forma automatizada, aunque existen formulaciones al respecto (Olaya, 2014). Según Rosas (2009), Ruiz y Torres (2008), el valor del umbral se puede obtener en base a procesos iterativos de ensayo y error hasta que se genere una red hídrica representativa de la cuenca. Sin embargo, Martínez (2007); Campillo, Díaz-Plaza (2009); Martínez-Martínez y Campos-Aranda (2010); Castellet et al. (2014); Paul, Mandla, y Singh (2015) indican que un valor del umbral equivalente al 1% de la acumulación total del flujo de la cuenca permite generar una red de cauces similares a la realidad, criterio que fue aplicado para la generación de cauces en este trabajo.

La dirección y acumulación de flujo, se calculan en dos etapas, la primera para delimitar la cuenca y en la segunda para establecer el valor del umbral del área delimitada.

- Watershed (Cuenca Hidrográfica).
Con la selección de un punto de salida de la cuenca, que por lo general es el punto más bajo, se delimita el área de aporte. El punto de salida, se ubica en la primera celda donde el valor de acumulación de flujo es mayor en la cuenca, independiente para cada MDE.
- Raster to Polygon (Raster a polígono).
Esta herramienta convierte el MDE delimitado anteriormente, en un archivo vectorial, que permite obtener el centroide, el área y el perímetro de la cuenca.
- Extract by mask (Extraer por máscara).
Se extrae las celdas del ráster que están dentro de la cuenca hidrográfica.
- Con (Evaluación Condicional).
Esta herramienta realiza una evaluación condicional basada en el valor numérico del umbral a partir de la acumulación del flujo, generando la red hídrica de la cuenca.
- Stream Order (Orden del flujo).
Esta herramienta permite identificar y clasificar el orden de la red hídrica, asignando un valor numérico en función de la unión de los cauces. Se utilizó el criterio de Strahler (1957), donde establece que el orden del flujo se incrementa cuando se unen dos cauces del mismo orden.
- Stream to features (Unión del flujo).
Esta herramienta vectoriza el ráster generado por “Stream Order” y permite determinar el orden y la longitud de los cauces.
- Reclassify (Reclasificación).
Esta herramienta reclasifica los rangos altitudinales de la cuenca, que es necesaria para generar las curvas características.
- Slope (Pendiente).
Esta herramienta identifica el cambio de elevación respecto a la distancia entre dos celdas (pendiente media de la cuenca). La pendiente se calculó en porcentaje.

En la Figura 31, se resume la secuencia de herramientas utilizadas para la delimitación de la cuenca:

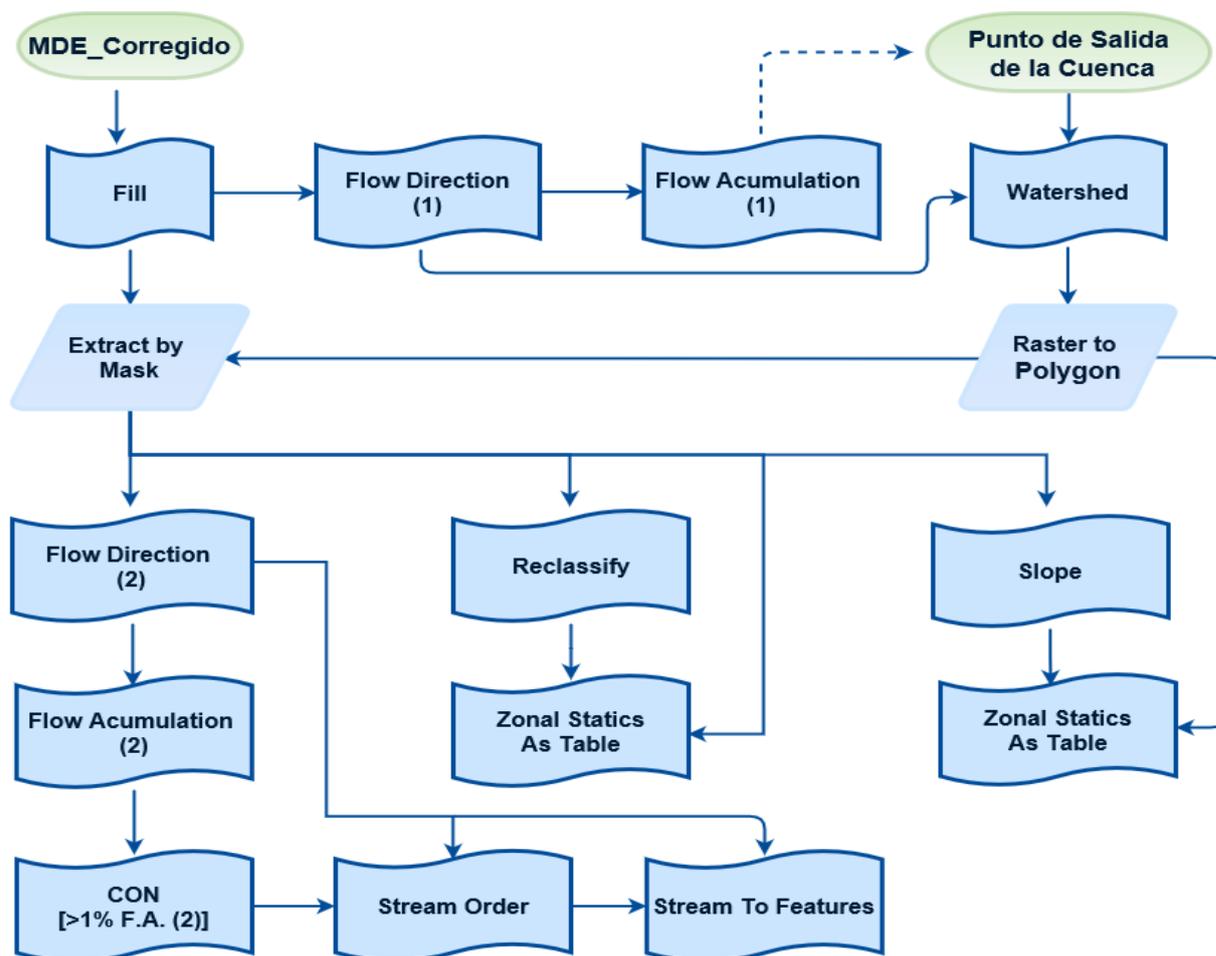


Figura 31. Proceso de extracción de una cuenca hidrográfica a partir de un MDE.
Fuente / Elaboración: El Autor.

Los parámetros morfométricos de la cuenca en estudio se calculan mediante las fórmulas descritas en el numeral 1.4 del capítulo 1. La comparación de los MDE individuales se puede hacer en base a análisis estadísticos, sin embargo, para tener una descripción más detallada también se aplica el análisis multifractal.

3.5. Análisis estadístico de los MDE.

Para comparar y validar los MDE de las diferentes fuentes, se puede utilizar los siguientes enfoques (Forkuor y Maathuis, 2012; Ibañez Martínez, 2008):

- Precisión absoluta o comprobación cuantitativa: Evalúa numéricamente los valores de elevación, en función de comparaciones o mediciones realizadas in situ, es decir en campo.
- Precisión relativa o comprobación cualitativa: Evalúa la exactitud a partir de resultados derivados del MDE. En este trabajo se calculó los parámetros morfo-métricos del área en estudio; para realizar el análisis y las comparaciones entre los MDE generados de diferentes fuentes (LiDAR y satelitales).

Autores como Felicísimo (1994), Moreno Brotóns y Alonso Sarría, Gomariz Castillo, y Alonso Bernardo (2010), manifiestan que un análisis visual del mapa de elevaciones es importante para evaluar la calidad general del MDE, utilizando modelos 3D u otras imágenes de comparación como fotografías etc. Es por eso que se realizó un análisis estadístico de los MDE, para describir variaciones estadísticas generales que no son detectables con la simple inspección visual. Las pruebas estadísticas convencionales incluyen el error medio, error estándar y para este trabajo se incluyó un test de significancia, es decir una desviación estadística significativa con la aplicación de un percentil de distribución (t de Student) para obtener un porcentaje de confianza para cada MDE a partir de sus valores intrínsecos.

3.6. Análisis Multifractal Sand-box.

En el presente análisis se aplicó el algoritmo de selección aleatoria de N puntos pertenecientes a la red de drenaje propuesto por Tél et al. (1989), modificado por Vicsek (1990). Consiste en el conteo de cada punto (i), el número de píxeles M_i que pertenecen a la red dentro de una circunferencia de diámetro (r), centrada en un punto a lo largo de toda la red de drenaje.

Se elige los centros de la red al azar y se traza círculos de radio (R) alrededor de ellos. El número medio de píxeles que forman parte de la red se calcula como $\{ [M(R)]^q \}$, donde (q) representa el momento estadístico:

$$\sum_i \left(\frac{M_i}{C} \right)^{q-1} \frac{M_i}{M_0} \propto \left(\frac{R}{L} \right)^{(q-1) D_q} \quad (23)$$

(M_0) es el número total de píxeles de la imagen, (L) el lado de mayor valor de la imagen, lo cual es igual a uno después de la normalización, (D_q) es la dimensión de Rényi de la dimensión fractal generalizada.

Se considera la relación (M_i/M_0) como la distribución de probabilidad sobre una aproximación fractal, la ecuación anterior puede ser derivada como:

$$\left(\left[\frac{M(R)}{M_0} \right]^{q-1} \right) \propto \left(\frac{R}{L} \right)^{(q-1) D_q} \quad (24)$$

La dimensión de Renyi o dimensión fractal generalizada (D_q) es definida para $(q \neq 1)$ con la siguiente ecuación:

$$D_q (R/L) = \frac{1}{q-1} \lim_{R/L \rightarrow 0} \frac{\ln \langle [M(R)/M_0]^{q-1} \rangle}{\ln (R/L)}, \quad \text{para } q \neq 1 \quad (25)$$

Y para $(q=1)$, Cuando:

$$D_q (R/L) = \lim_{R/L \rightarrow 0} \frac{\ln [M(R)/M_0]}{\ln (R/L)}, \quad \text{para } q = 1 \quad (26)$$

Las dimensiones generalizadas o dimensiones de Renyi, se obtienen mediante una regresión lineal de mínimos cuadrados, donde la pendiente de las curvas de escala es $\ln \langle [M(R)/M_0]^{q-1} \rangle$ para $(q \neq 1)$ y $\ln [M(R)/M_0]$ para $(q = 1)$ (S. De Bartolo et al., 2004). El conjunto de estas dimensiones fractales generalizadas se llama espectro de Renyi dónde (D_0) es la dimensión fractal del conjunto, (D_1) la dimensión de información que describe el grado de heterogeneidad en la medida, (D_2) la dimensión fractal de correlación asociada con la función de correlación que determina la distribución media de la medida, y (D_q) la función decreciente con respecto a (q) para una medida distribuida multi fraccionalmente dónde $(D_0 > D_1 > D_2)$.

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Procesamiento de los datos LiDAR.

El proceso para obtener un MDT a partir de datos LiDAR inicia con el análisis estadístico de los datos, aplicando el comando “Catalog” del software FUSION v 3.6. Los resultados más importantes de este análisis incluyen la densidad nominal media y los valores de elevación. La Figura 32, muestra los resultados para la zona de estudio. La densidad nominal de retornos es de 0.17 puntos/m² obtenidos de 33 360 996 puntos en total. El 72,36 % de la superficie total de la cuenca tiene una densidad menor a 2 puntos por m², el 26,34 % tiene una densidad entre 2 a 5 puntos por m² y únicamente el 1.30 % excede la densidad de 5 puntos por m². Este resultado indica que el conjunto inicial de puntos LiDAR presenta una baja densidad.

File Summary

Filename	Minimum X	Minimum Y	Minimum Elevation	Maximum X	Maximum Y	Maximum Elevation	Total Returns	Nominal Return Density
C:\DEM\DEM_LIDAR\DATOS\datos_Lidar.las	703543.50	9553008.60	1520.00	719759.09	9564558.28	4599.98	32,370,824	0.17

Classification Summary (valid for LAS format files only)

Class value	# returns	Interpretation
0	0	Created, never classified
1	18,711,137	Unclassified
2	14,649,859	Ground
3	0	Low Vegetation
4	0	Medium Vegetation
5	0	High Vegetation
6	0	Building
7	0	Low Point (noise)
8	0	Model Key-point (mass point)
9	0	Water
10	0	Reserved
11	0	Reserved
12	0	Overlap Points
Overall (LAS files only)	33,360,996	

Return Density

Density computed using a cell that is 1.00w by 1.00h units (1.00 square units)

Density image is 11551 rows by 16217 columns: catalog_todos_last_return_density.jpg

Minimum return density (returns per square unit) 1.00
 Maximum return density (returns per square unit) 368.00
 Average return density (returns per square unit) 1.45
 Standard deviation of return density (returns per square unit) 1.39

Color	Description	Percentage of Area with Data	Percentage of Total
Yellow	Cells with no points (could be outside coverage area)	NA	87.71
Red	Density less than minimum specification (less than 2.00 points per square unit)	72.36	8.89
Green	Density within specification (2.00 to 5.00 points per square unit)	26.34	3.24
Blue	Density exceeds specification (more than 5.00 points per square unit)	1.30	0.16

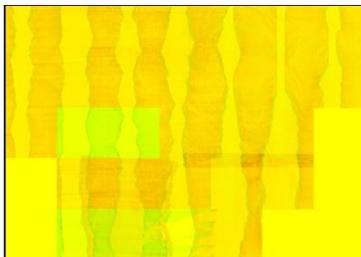


Figura 32. Densidad Nominal de retornos, resultado del comando Catalog.

Fuente/Elaboración: El Autor.

Para la eliminación de outliers, se utilizó el comando “filterdata” mediante 6 iteraciones. En la Figura 33, se observa la presencia de outliers representados en la parte izquierda de la imagen, mientras que después de la eliminación la distribución de los puntos es más uniforme. Los puntos que pertenecen al suelo descubierto fueron 5 961 287. Los cuales fueron clasificados con el comando “groundfilter” (Fig. 34).

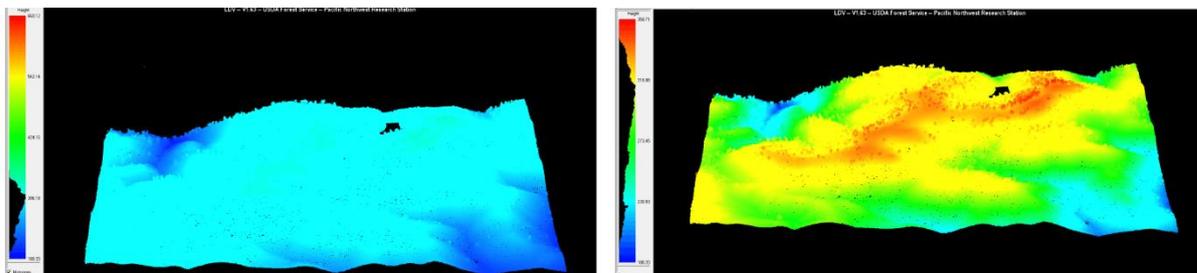


Figura 33. Eliminación de (outliers), resultado del comando Filterdata.
Fuente: Datos LiDAR & software FUSION.
Elaboración: El Autor.

Classification Summary (valid for LAS format files only)

Class value	# returns	Interpretation
0	0	Created, never classified
1	1,078,924	Unclassified
2	4,882,363	Ground
3	0	Low Vegetation
4	0	Medium Vegetation
5	0	High Vegetation
6	0	Building
7	0	Low Point (noise)
8	0	Model Key-point (mass point)
9	0	Water
10	0	Reserved
11	0	Reserved
Overall (LAS files only)	5,961,287	

Return Density

Density computed using a cell that is 1.00w by 1.00h units (1.00 square units)

Density image is 11551 rows by 16217 columns: catalog_MDE_PL_return_density.jpg

Minimum return density (returns per square unit) 1.00
 Maximum return density (returns per square unit) 368.00
 Average return density (returns per square unit) 1.22
 Standard deviation of return density (returns per square unit) 0.99

Color	Description
Yellow	Cells with no points (could be outside coverage area)
Red	Density less than minimum specification (less than 1.00 points per square unit)
Green	Density within specification (1.00 to 2.00 points per square unit)
Blue	Density exceeds specification (more than 2.00 points per square unit)

Percentage of Area with Data	Percentage of Total
NA	97.40
0.00	0.00
97.93	2.54
2.07	0.05

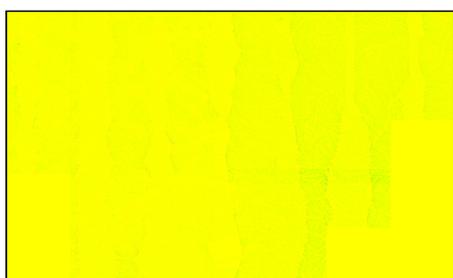


Figura 34. Densidad nominal de retornos - resultado luego de aplicar los comandos Catalog y Groundfilter (eliminación de outliers).
Fuente / Elaboración: El Autor.

El MDT fue generado mediante el comando “Grid Surface Create”, lo cual creó una imagen en formato ráster. Debido a las resoluciones de las fuentes satelitales, el tamaño del píxel generado para cada MDT fue 12.5 m, 30 m, 50 m y 75 m. (Figura 35).

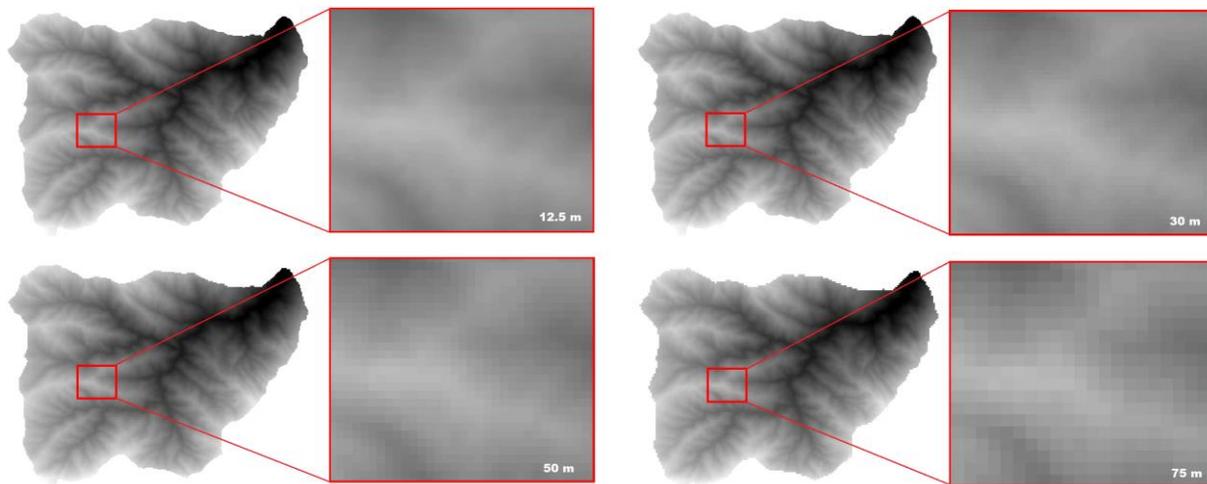


Figura 35. Remuestreo del MDT a diferentes tamaños de píxel (12.5, 30, 50, 75) m.
Fuente / Elaboración: El Autor.

4.2. Procesamiento de los MDE a partir de fuentes satelitales.

4.2.1. Obtención de los datos:

La Figura 36 muestra el visor de descarga para los MDE de ASTER y SRTM en la página Earth Explorer.

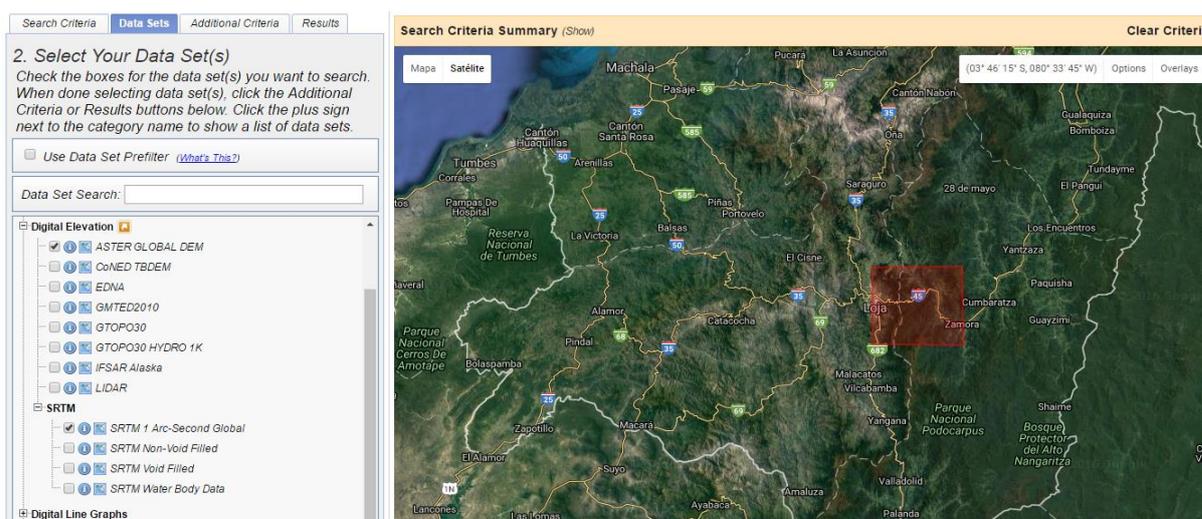


Figura 36. Interfaz gráfica del visor de descargas de Earth Explorer.

Fuente: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (2017)

Elaboración: El Autor.

El MDE de ALOS PALSAR fue descargado de la página Alaska Satellite Facility's. La Figura 37 muestra el visor de descarga:

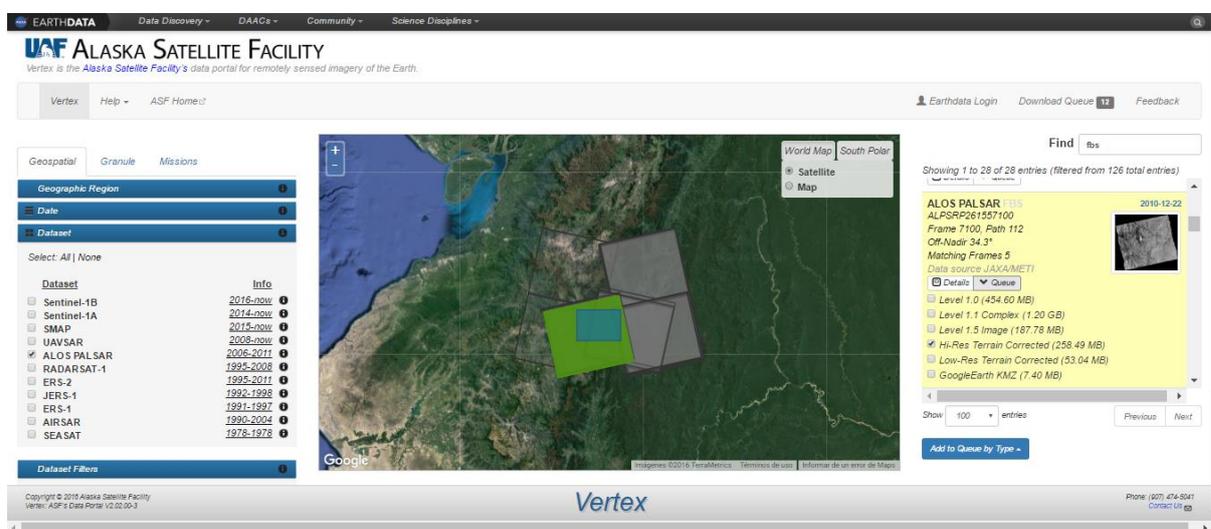


Figura 37. Interfaz gráfica del visor de descargas de Alaska Satellite Facility's.

Fuente: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/?> (2017)

Elaboración: El Autor.

Ambos visores de descarga requieren la definición de las coordenadas de la zona de interés. Para los MDE de ALOS PALSAR fue adicionalmente necesario realizar una búsqueda de FBS (Fine Beam Single-Polarization) que permite encontrar la mejor resolución porque aplica un modo de haz de polarización fina (Landmap, 2016).

En la Tabla 14, se presenta un resumen de las características de los MDE obtenidos de las fuentes satelitales usadas en la presente investigación:

Tabla 14. Características principales de los MDE.

DESCRIPCIÓN	ASTER v 2	SRTM v 3	ALOS PALSAR 1
Formato del archivo	<i>Geo .TIFF</i>		
Bits	16	16	32
Proyección	<i>Coordenadas Geográficas</i>		
Datum Horizontal	<i>WGS84</i>		
Datum Vertical	<i>EGM96</i>		
Dimensiones	<i>108.03x108.03 km ó 1°x1°</i>		<i>Variable</i>
Precisión Vertical abs. (rel)	<i>17 m (20 m)</i>	<i>16 m (10 m)</i>	<i>16 m</i>
Precisión Horizontal abs. (rel)	<i>30 m</i>	<i>20 m (15 m)</i>	<i>10 m</i>
Generación	<i>NASA/METI</i>	<i>NASA/CGIAR</i>	<i>NASA/JAXA</i>
Cobertura	<i>83°N - 83°S</i>	<i>60°N - 56°S</i>	<i>87.5°N – 75.9°S</i>

Fuentes: (Tachikawa, Hato, et al., 2011)

Elaboración: El Autor.

4.2.2. Pre-procesamiento.

El pre-procesamiento se aplicó a los MDE SRTM, para rellenar las zonas sin datos (MDE original; Fig. 38a). El relleno se realizó de acuerdo al método de estadísticas focalizadas. Una vez aplicado el pre-procesamiento, el MDE corregido se muestra en la Figura (38b):

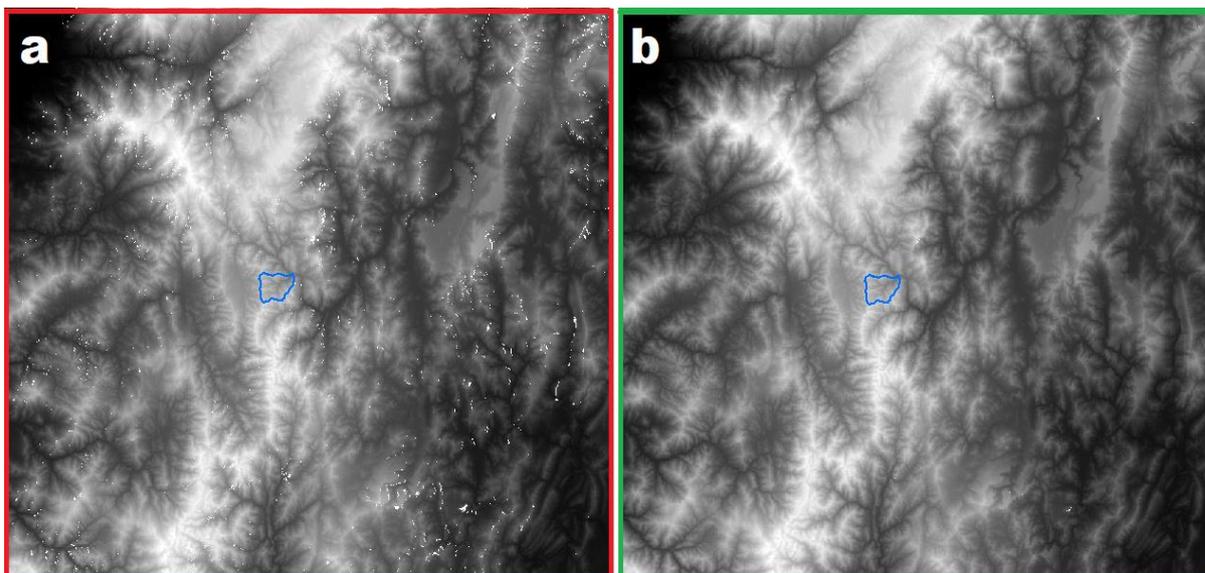


Figura 38. Relleno de zonas sin datos dentro de un MDE (Pre-procesamiento).
Fuente / Elaboración: El Autor.

4.2.3. Procesamiento.

Para cubrir toda el área de estudio con los MDE de ASTER y SRTM, fue necesario realizar un mosaico de los 4 MDE de cobertura parcial. Finalmente, se recortó la cuenca de estudio y se exportó los MDE (ASTER, SRTM, ALOS PALSAR) en resoluciones uniformes: (12.5 le corresponde a ALOS PALSAR) y 30 m, 50 m, 75 m para los análisis subsiguientes. Un ejemplo se muestra en la Fig. 39.

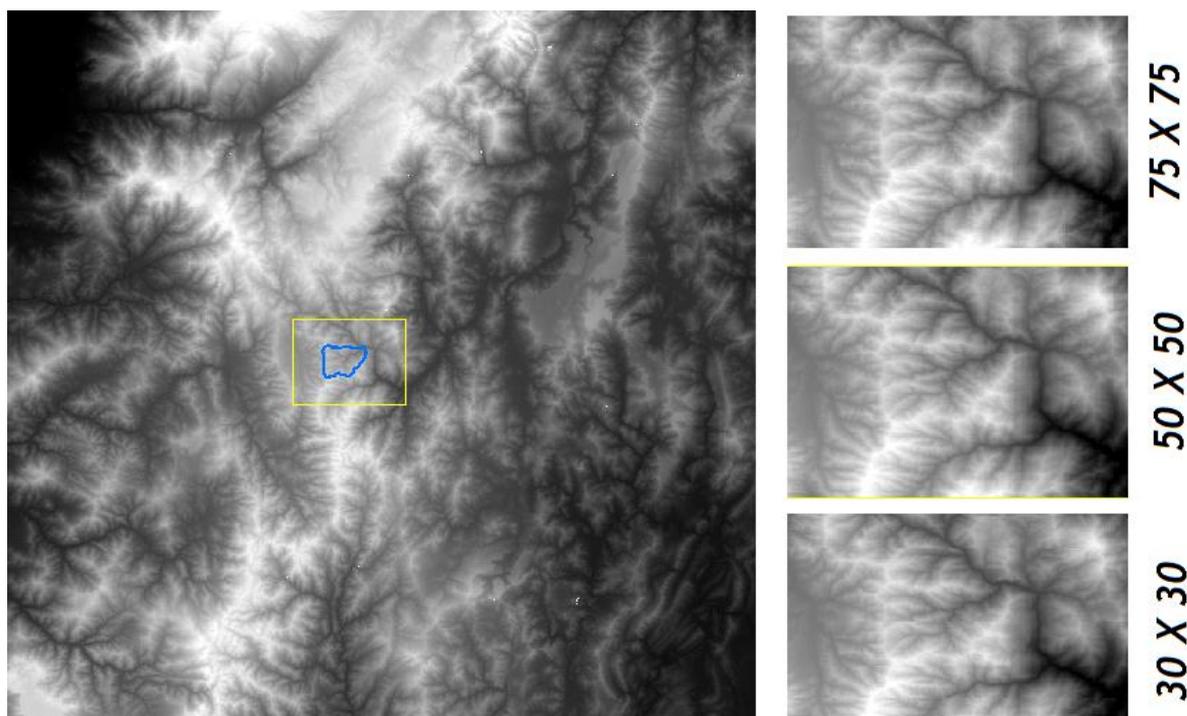


Figura 39. Remuestreo de un MDE a resoluciones de 30 m, 50 m, 75 m.
Fuente / Elaboración: El Autor.

4.3. Delimitación de la cuenca hidrográfica.

4.3.1. Parámetros morfométricos de la cuenca hidrográfica.

Para analizar y comparar los MDE de las diferentes fuentes, se calculó los parámetros morfométricos de la cuenca hidrográfica. El análisis se basa en las principales características de la cuenca: área, perímetro, pendiente media y longitud total de cauces.

A continuación, se analiza la variación de los valores en los MDE de las diferentes fuentes; a los tamaños originales de 30 m, porque es la resolución que se obtiene por defecto de las fuentes ASTER y SRTM. Además, los MDE de ALOS PALSAR y LIDAR, son de mayor resolución que se puede redimensionar a tamaños de píxel mayores con una leve pérdida de información (Wu et al., 2008). Los MDE de alta resolución también fueron comparados en base a la resolución original de ALOS PALSAR (12.5 m). En función a la media se describen los parámetros que menos variación tienen respecto a los demás MDE.

Parámetros generales:

1. Área:

Para MDE con resolución de 12.5 m, la Figura 40 indica que la cuenca hidrográfica presenta un valor menos representativo en LiDAR debido a que considera la superficie de acuerdo a la forma original del terreno. Mientras que en ALOS PALSAR incrementa el área, porque omite el relieve original del terreno, indicando que existe una variación de 0,13 km² entre los MDE mencionados.

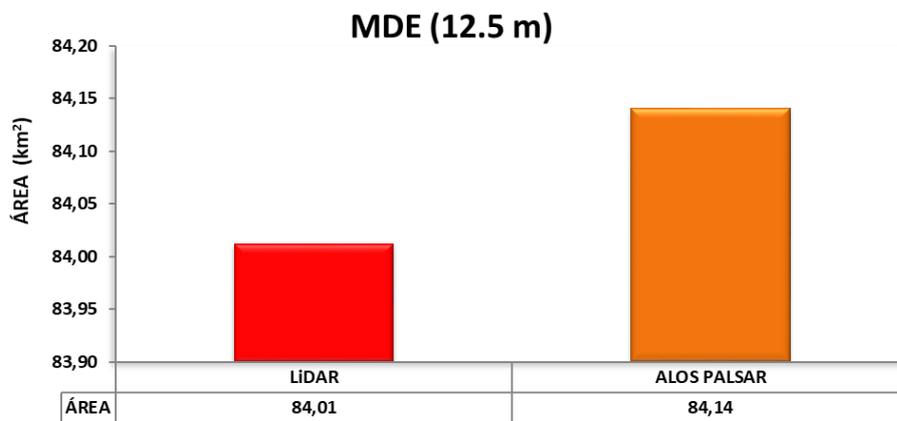


Figura 40. Parámetros Morfométricos - Área (Resolución 12.5 m)
Fuente / Elaboración: El Autor.

De acuerdo a la Figura 41, los MDE con resolución de 30 m, indican que el área de la cuenca hidrográfica señala un valor menos representativo en LiDAR, debido a que considera la superficie de acuerdo a la forma original del terreno. Mientras que los otros MDE incrementan el área, porque la señal de sus ondas no penetra directamente al terreno, sino que toman en cuenta una elevación aproximada en las partes altas. Conforme señala la media de los MDE analizados, la mayor diferencia se encuentra entre LiDAR y ASTER con un valor de 0.31 km². Pero los MDE ALOS PALSAR y SRTM son más cercanos a la media, con una diferencia mínima de 0.05 km².

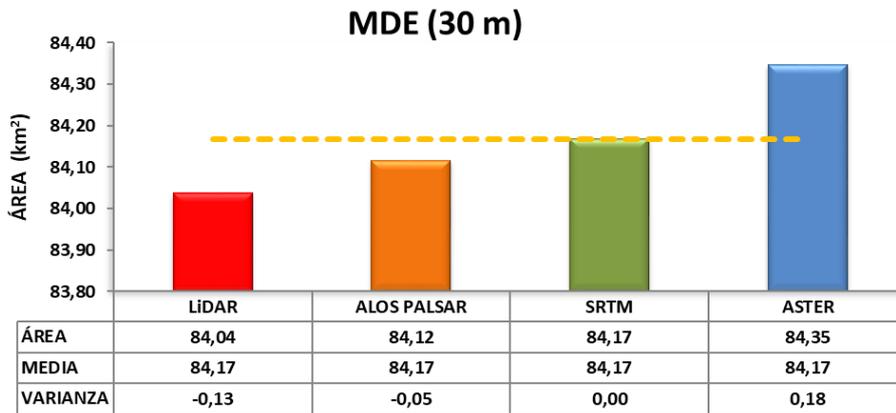


Figura 41. Parámetros Morfométricos - Área (Resolución 30 m)
Fuente / Elaboración: El Autor.

De acuerdo a la Figura 42, los MDE con resolución de 50 m, indican que el área de la cuenca hidrográfica tiene un valor de 84.04 km² en LiDAR. Debido a que considera la superficie de acuerdo a la forma original del terreno. Mientras que en ALOS PALSAR y SRTM, presentan valores muy cercanos a la media, a diferencia de ASTER, que se encuentra con un valor superior. Por consiguiente, se puede apreciar que los MDE que se encuentran en los extremos, presentan valores muy dispersos. Probablemente se debe al remuestreo.

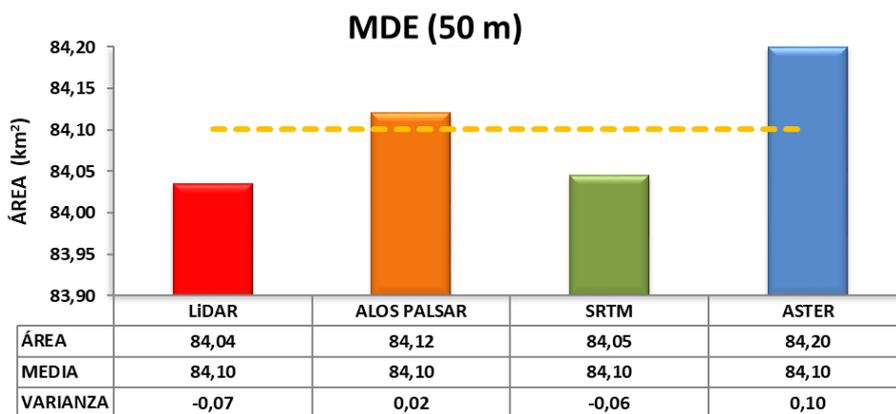


Figura 42. Parámetros Morfométricos - Área (Resolución 50 m)
Fuente / Elaboración: El Autor.

Analizando la Figura 43, los MDE con resolución de 75 m, señala que el área de la cuenca hidrográfica presenta un valor de 84.13 km² en LiDAR, valor muy cercano a SRTM. Mientras que existe una disminución del área en ASTER, pero ALOS PALSAR representa la mayor

área respecto a los MDE antes mencionados. Tomando en cuenta que la variación en general de los valores es poco significativa, posiblemente se debe al cambio de píxel para el análisis.

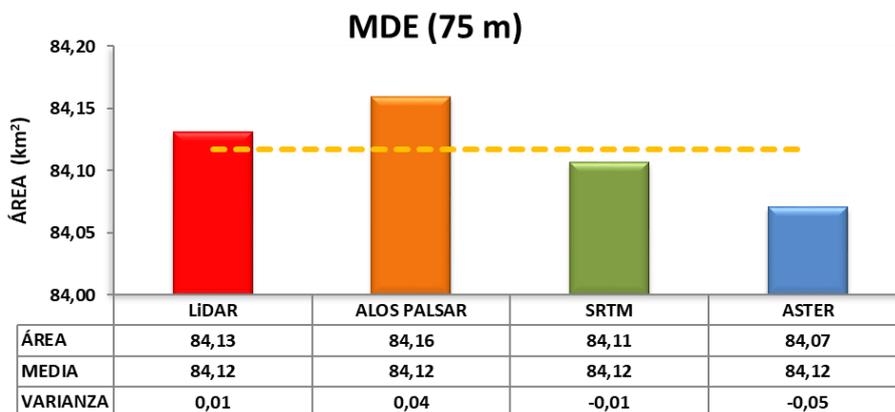


Figura 43. Parámetros Morfométricos - Área (Resolución 75 m)
Fuente / Elaboración: El Autor.

De acuerdo a los resultados de las áreas obtenidas para las diferentes resoluciones entre los MDE, se presenta un resumen en la Figura 44. Se observa que ALOS PALSAR es el MDE que tiene menor variación respecto a los tamaños de píxel generados para las diferentes resoluciones. En función a lo anterior, se demuestra que tiene una diferencia aproximada de 0.20 km² entre la superficie real del terreno (LiDAR) y las generadas por MDE de fuentes satelitales (SRTM y ASTER) en las partes altas por donde es delimitada la cuenca. Además, se aprecia que la variación en los valores de área, influye directamente el remuestreo realizado. En general, se puede decir que a menor resolución las variaciones del área son menores. Porque el tamaño de un píxel mayor, considera las características del terreno sintetizadas en un solo valor promedio.

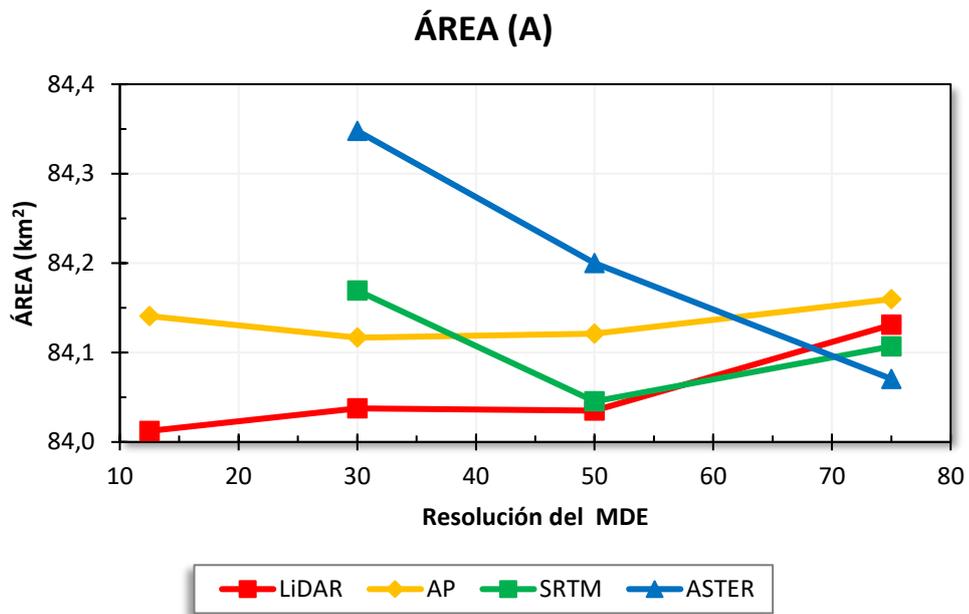


Figura 44. Representación del área en diferentes resoluciones.
Fuente / Elaboración: El Autor.

2. Perímetro:

Para los MDE con resolución de 12.5 m. La Figura 45, indica que el perímetro de la cuenca hidrográfica presenta un valor más representativo en LiDAR debido a que considera la forma original del terreno. Mientras que en ALOS PALSAR disminuye el perímetro, porque linealiza las características del terreno representadas en los píxeles.

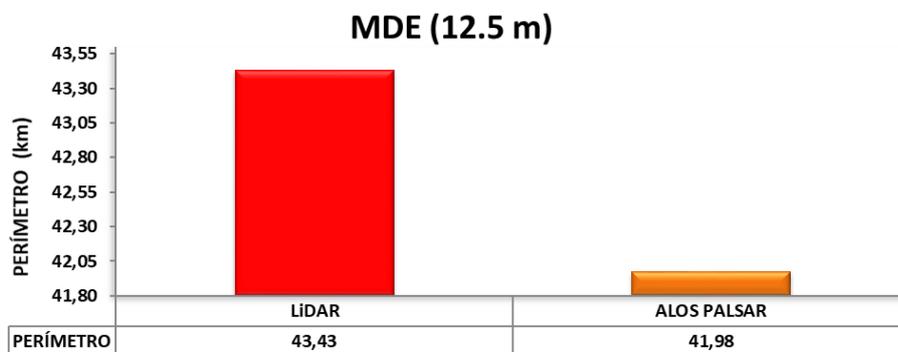


Figura 45. Parámetros Morfométricos – Perímetro (Resolución 12.5 m)
Fuente / Elaboración: El Autor.

Para MDE con resolución de 30 m; la Figura 46 indica que el perímetro de la cuenca hidrográfica presenta un valor más representativo en ASTER y LiDAR. Mientras que ALOS PALSAR y SRTM tienen un valor bajo, mostrando que SRTM es el MDE que menor variación tiene respecto a la media.

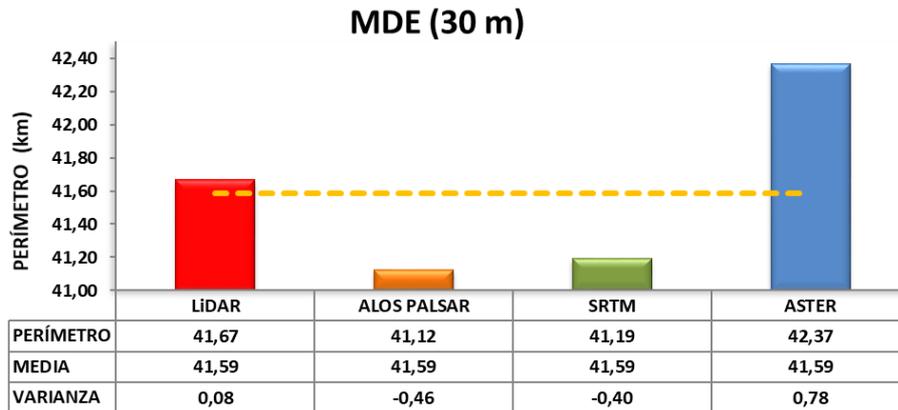


Figura 46. Parámetros Morfométricos – Perímetro (Resolución 30 m)
Fuente / Elaboración: El Autor.

Respecto a la resolución de 50 m; la Figura 47 indica que el perímetro de la cuenca hidrográfica presenta un valor de 40,68 km para LiDAR y 41,84 km para ASTER que son considerados valores superiores respecto a ALOS PALSAR y SRTM, los mismos que se encuentran bajo la media. Debido a la variación en las respectivas resoluciones.

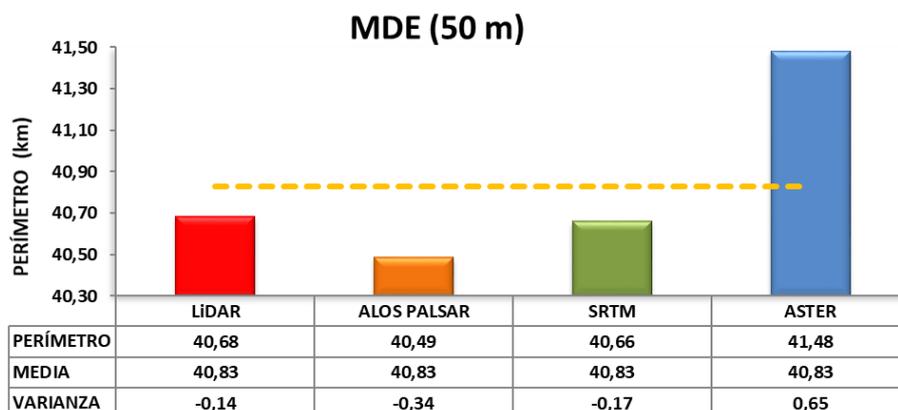


Figura 47. Parámetros Morfométricos – Perímetro (Resolución 50 m)
Fuente / Elaboración: El Autor.

Respecto a la resolución de 75 m; la Figura 48 indica que el perímetro de la cuenca hidrográfica alcanza sus valores máximos en LiDAR y ASTER. Respecto a ALOS PALSAR y SRTM el valor de sus perímetros se encuentran bajo la media, porque con esta resolución se disminuye el número de píxeles, eliminando las características de la cuenca.

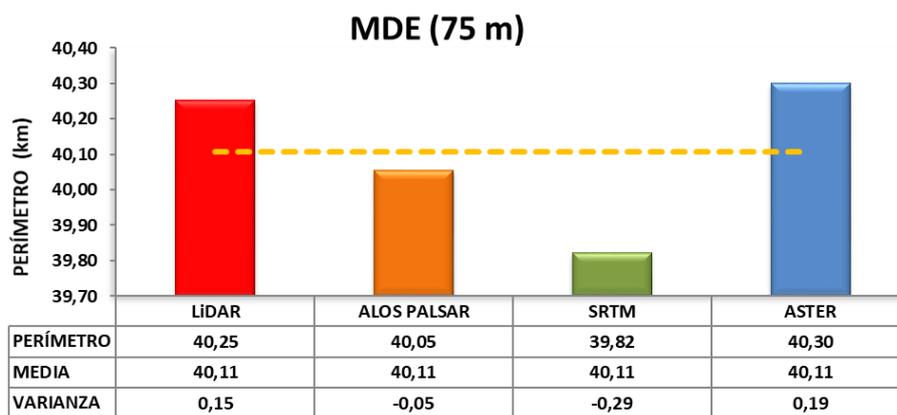


Figura 48. Parámetros Morfométricos – Perímetro (Resolución 75 m)
Fuente / Elaboración: El Autor.

En general, en la variación de los valores del perímetro respecto a sus resoluciones, se puede destacar lo siguiente: que mientras los píxeles son más pequeños se puede describir más características del terreno caso contrario ocurre cuando los valores de los píxeles son mayores. En la Figura 49, se observa que existe una relación directamente proporcional entre la resolución espacial de los MDE con el perímetro. Debido a que los tamaños de píxel mayores, no permiten ubicar con exactitud los límites de la cuenca.

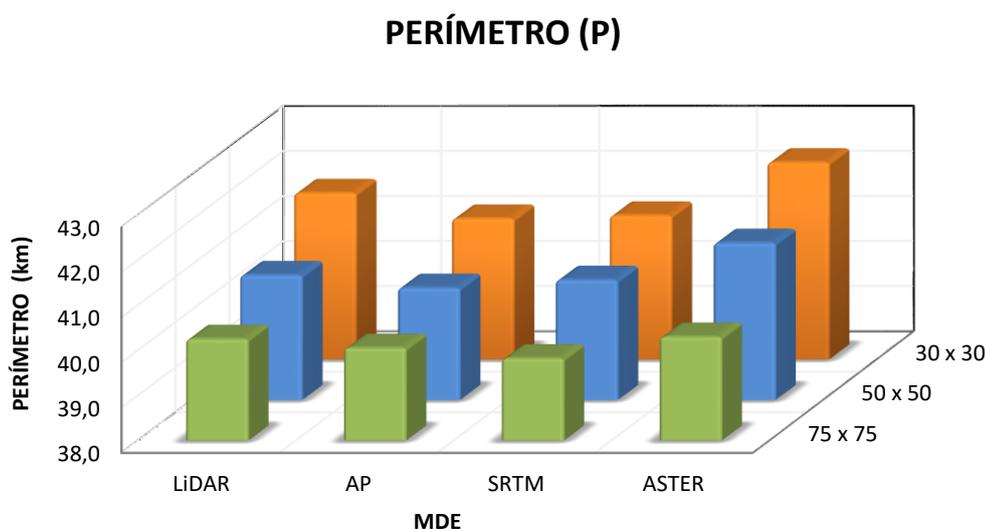


Figura 49. Representación del perímetro a diferentes resoluciones.
Fuente / Elaboración: El Autor.

Parámetros de drenaje:

Entre los parámetros de drenaje se consideran los siguientes:

3. Longitud total de los cauces:

De acuerdo a la Figura 50: LiDAR y ASTER generan valores mayores mientras que SRTM y ALOS PALSAR menores. Se destaca que ALOS PALSAR en la resolución de 12.5 m, su longitud muestra el valor intermedio (57.913 km) respecto a los otros MDE. Deduciendo que, a mayor resolución, mayor será la longitud total, porque los píxeles con tamaños menores describen con mayor exactitud los cauces, por lo tanto, su representación tendrá mayor sinuosidad por ende mayor longitud.

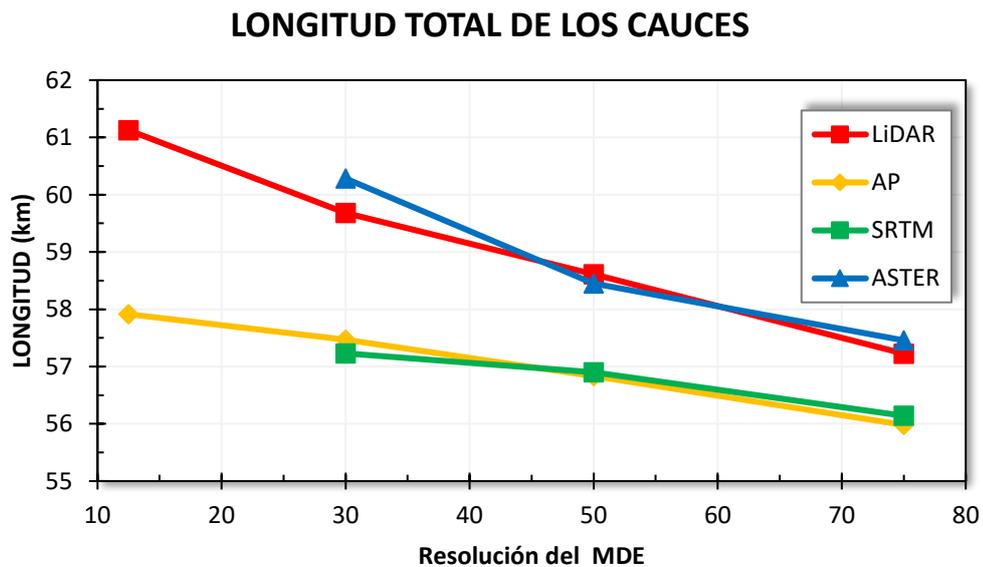


Figura 50. Longitud total de cauces.
Fuente / Elaboración: El Autor.

4. Longitud y Orden de drenaje:

En la Figura 51, se observa que la longitud para el orden 1 oscila entre 25.3 km (SRTM 75) a 29.9 km (ASTER 50) y para el orden 2 varía entre 14.7 km (ALOS PALSAR 75) a 18.9 km (LIDAR 12.5). Dichos valores extremos se presentan en resoluciones principalmente

resampladas. De este modo, los valores con menor variación se presentan para la resolución de 30 m. La única diferencia es que SRTM muestra una mayor longitud en cauces de orden 4 respecto a orden 3, debido a la sinuosidad. En general, un relieve de tipo montañoso permite definir de mejor manera el origen de los cauces (orden 1). Además, la longitud del orden de drenaje se debe principalmente al relieve que presenta cada MDE.

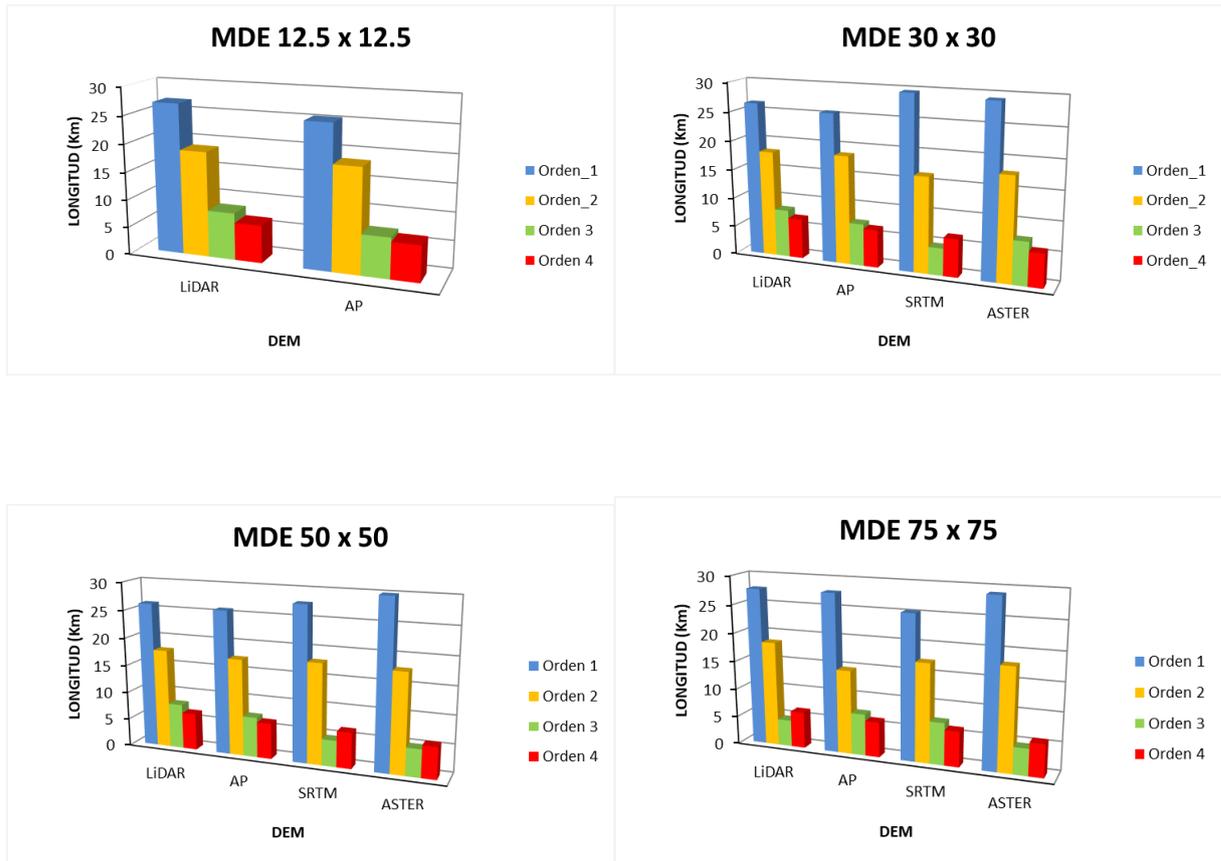


Figura 51. Longitud y orden de drenaje.
Fuente / Elaboración: El Autor.

La Figura 52, muestra los órdenes de drenaje en la cuenca, según Strahler (1957). Se observa que, en la distribución de las redes de drenaje predomina el orden 1 y 2, debido al relieve accidentado.

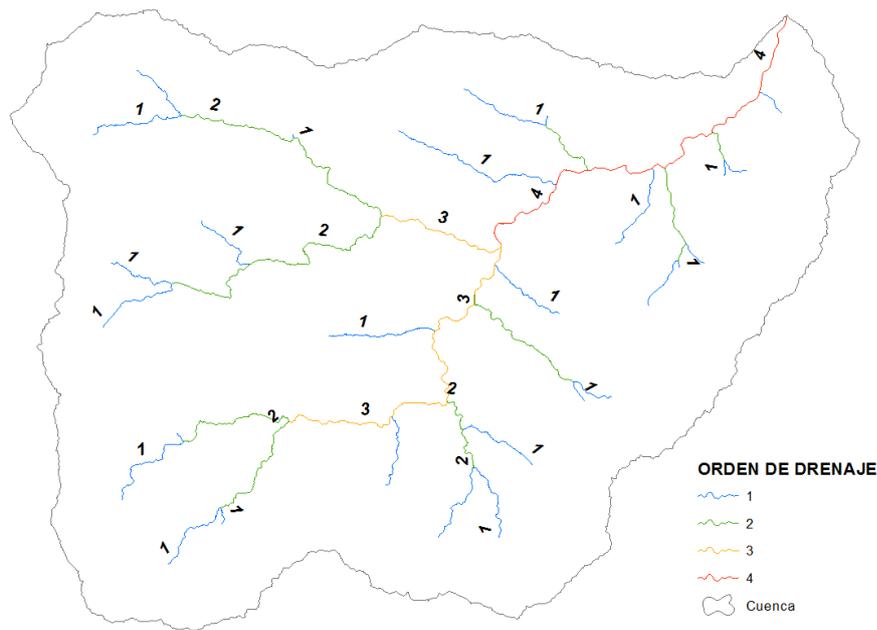


Figura 52. Distribución del orden hídrico en la cuenca hidrográfica.
Fuente / Elaboración: El Autor.

Los parámetros de relieve:

Estos parámetros dependen de la distribución altitudinal que presentan los MDE

5. Pendiente de la cuenca:

La Figura 53 muestra que la pendiente media de la cuenca es directamente proporcional a la resolución, es decir a mayor resolución del MDE mayor es la pendiente. Es necesario desatacar que, LiDAR genera mayores pendientes debido a que representa mejor las características del terreno. ALOS PALSAR genera una pendiente similar en resoluciones de 12.5 m y 30 m. Existe una diferencia significativa entre los extremos de los valores para la pendiente, que corresponden entre 47.5 % a 65.6 %. Un valor medio de 56 % representaría una pendiente adecuada para la cuenca debido a su accidentada topografía. Pudiéndose observar que la mejor presentación para este valor se genera con los MDE a una resolución de 30 m.

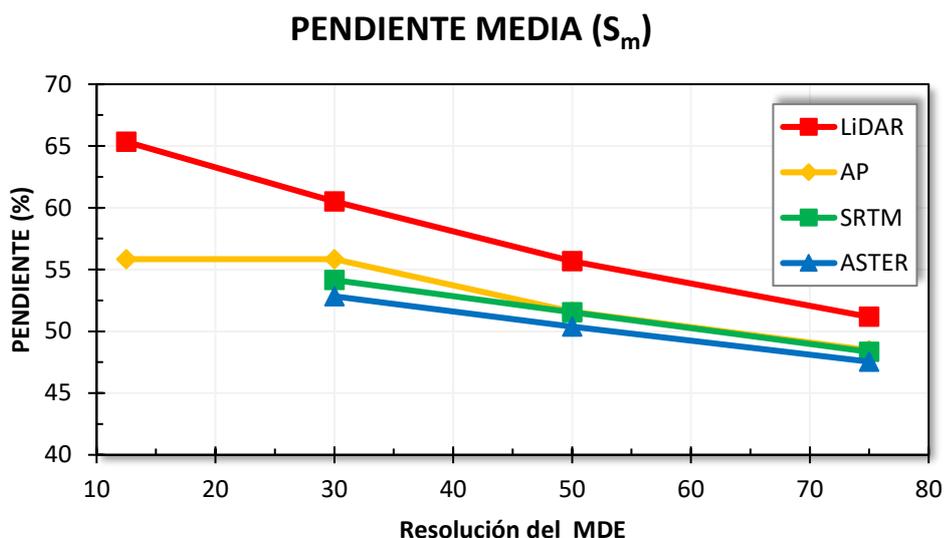


Figura 53. Pendiente media de la cuenca hidrográfica.
Fuente / Elaboración: El Autor.

6. Pendiente del cauce principal.

En la Figura 54, se muestra que el cauce principal de ALOS PALSAR presenta una pendiente mayor en todas las resoluciones que varía entre 6.67 % a 6.90 %, mientras que LiDAR presenta valores menores, entre 6.25 % a 6.68 %. Para los MDE de ASTER y SRTM, se mantienen valores intermedios respecto a los anteriores. En el caso de LiDAR representa con más detalle la elevación del terreno en las partes altas. Mientras que los demás MDE están representados por una cobertura ponderada del terreno y vegetación, lo que hace que los valores de elevación en los orígenes del cauce se incrementen, dando como resultado también un aumento de la pendiente general del cauce principal.

Esta discusión se puede complementar con el Anexo 6, que presenta el perfil del cauce principal. Se observa que en las partes altas LiDAR presenta una elevación menor (del terreno); mientras que, en las partes bajas no es muy pronunciado el relieve circundante al río, por lo que no influye en mayor magnitud a la pendiente del cauce. Por consiguiente, la elevación de los MDE de ASTER, SRTM, ALOS PALSAR se ve sobrestimada debido a que la señal (radar) no incide directamente en el terreno, principalmente en las partes altas. La resolución del MDE es inversamente proporcional a la pendiente del cauce principal.

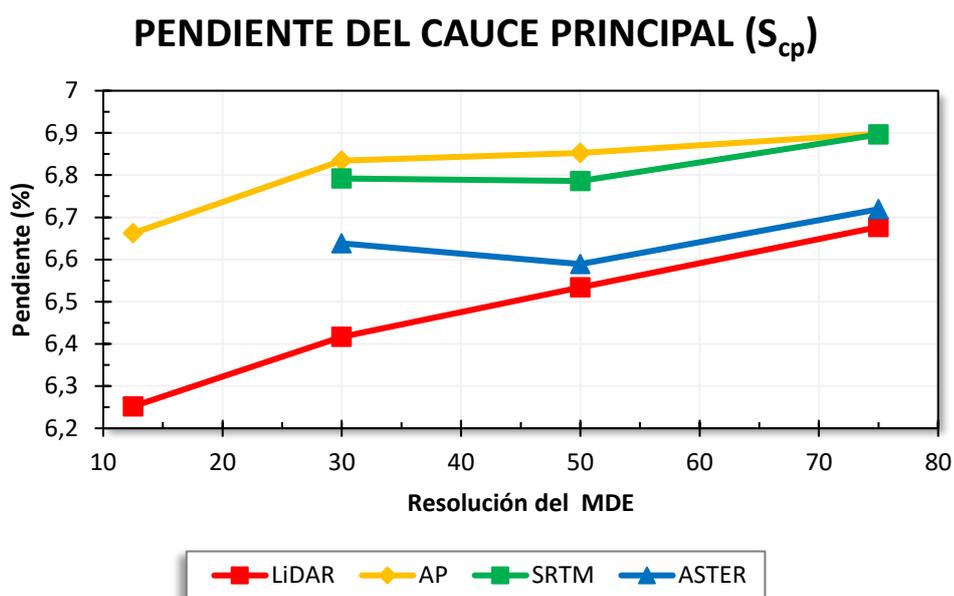


Figura 54. Pendiente media del cauce principal.

Fuente / Elaboración: El Autor.

De acuerdo a los parámetros morfométricos descritos anteriormente, en la Tabla 15 se resumen los parámetros de los MDE aptos para cada resolución. Se eligió la fuente del MDE respecto a la menor variación comparada con la media de cada resolución.

Tabla 15. MDE adecuado para cada resolución y parámetro morfométrico.

PARÁMETRO \ RESOL.	30 m	50 m	75 m
ÁREA	SRTM	ALOS PALSAR	SRTM
PERIMETRO	SRTM	SRTM	ALOS PALSAR
LONG. T. DE CAUCES	ALOS PALSAR	ASTER	SRTM
PEND. CUENCA	ALOS PALSAR	ALOS PALSAR	ALOS PALSAR
PEND. CAUCE P.	ASTER	SRTM	ASTER

Fuente / Elaboración: El Autor.

4.4. Análisis estadístico de los MDE.

Con la delimitación de la cuenca a partir de los MDE satelitales, se realiza un análisis estadístico que permite comparar de manera cuantitativa el grado de confiabilidad, esto a partir de los píxeles que componen el MDE respecto a la amplitud topográfica de la cuenca. Los resultados para cada uno de los MDE generados se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Resumen estadístico de los MDE de fuentes satelitales.

TAMAÑO:	12.5 x 12.5	30 x 30			50 x 50			75 x 75			UNIDAD
PARAMETRO:	AP_12.5	ALOS_P.	SRTM	ASTER	ALOS_P.	SRTM	ASTER	ALOS_P.	SRTM	ASTER	
FILAS:	636	318	318	320	190	191	193	127	127	127	Pixel
COLUMNAS:	831	415	415	418	249	249	250	166	165	165	Pixel
# MUESTRA:	28	20	20	20	15	15	15	13	13	13	muestras
E. MINIMA:	1635	1635	1618	1638	1637	1618	1638	1636	1640	1636	m.s.n.m.
E. MÁXIMA:	3254	3253	3234	3196	3252	3234	3195	3249	3223	3189	m.s.n.m.
E MEDIA:	2490,60	2490,54	2473,61	2443,09	2490,59	2473,94	2446,16	2490,72	2473,93	2445,94	m.s.n.m.
DESV. STR:	306,62	306,68	306,04	304,39	306,88	305,65	302,82	307,10	306,16	302,59	m.s.n.m.
RANGO:	1619	1618	1616	1558	1615	1616	1557	1613	1583	1553	m.s.n.m.
COEF. VAR:	12,31	12,31	12,37	12,46	12,32	12,35	12,38	12,33	12,38	12,37	%
ERROR TIP:	57,95	68,58	68,43	68,06	79,24	78,92	78,19	85,18	84,91	83,92	m.s.n.m.
ERROR MST.	2,33	2,75	2,77	2,79	3,18	3,19	3,20	3,42	3,43	3,43	%
TABLA T:	1,70	1,72	1,72	1,72	1,75	1,75	1,75	1,77	1,77	1,77	u
LIM SUP:	2589,17	2608,81	2591,63	2560,47	2629,50	2612,29	2583,23	2641,56	2624,31	2594,56	m.s.n.m.
LIM INF:	2392,03	2372,26	2355,58	2325,70	2351,68	2335,59	2309,09	2339,88	2323,56	2297,32	m.s.n.m.
CONFIANZA:	95,35	94,49	94,47	94,43	93,64	93,62	93,61	93,16	93,14	93,14	%

Fuente / Elaboración: El Autor.

En base a estos resultados se puede concluir que el MDE de ALOS PALSAR brinda la mejor confianza estadística y menor variación en el conjunto datos en todas las resoluciones, debido a su alta resolución original. Mientras que los MDE de SRTM y ASTER, tienen un comportamiento similar para la resolución de 75 m. Además, para el análisis se tomó en cuenta los MDE de fuentes satelitales porque representan una superficie ponderada envolvente del terreno incluyendo objetos/elementos sobre el terreno/suelo, mientras que los MDT generados con LiDAR difieren con los modelos obtenidos de fuentes satelitales. Se puede considerar los MDE de SRTM a una resolución de 30 m x 30 m como una segunda opción con mejores resultados respecto a los MDE de ASTER. Esto se debe a que el radar tiene la capacidad de realizar mediciones de la superficie de la Tierra, con una mínima afectación por las condiciones climáticas, posición solar e incluso si es de día o de noche.

4.5. Distribución espacial de las redes e inspección visual.

Las figuras (56, 57, 58 y 59) muestran las redes de drenaje y la distribución sobre la cuenca. Esta sección realiza una comparación visual de las zonas que presentan mayores diferencias en la ubicación del cauce respecto a la red generada en base de los MDE de fuentes satelitales y de LiDAR. La red de drenaje fue generada en base a la metodología del apartado 3.4 y se determinó con un mapa base del programa Qgis (Fig.55). Se consideran 4 zonas (A, B, C, D) donde los cauces tienen mayor dificultad para delinear correctamente los cauces.

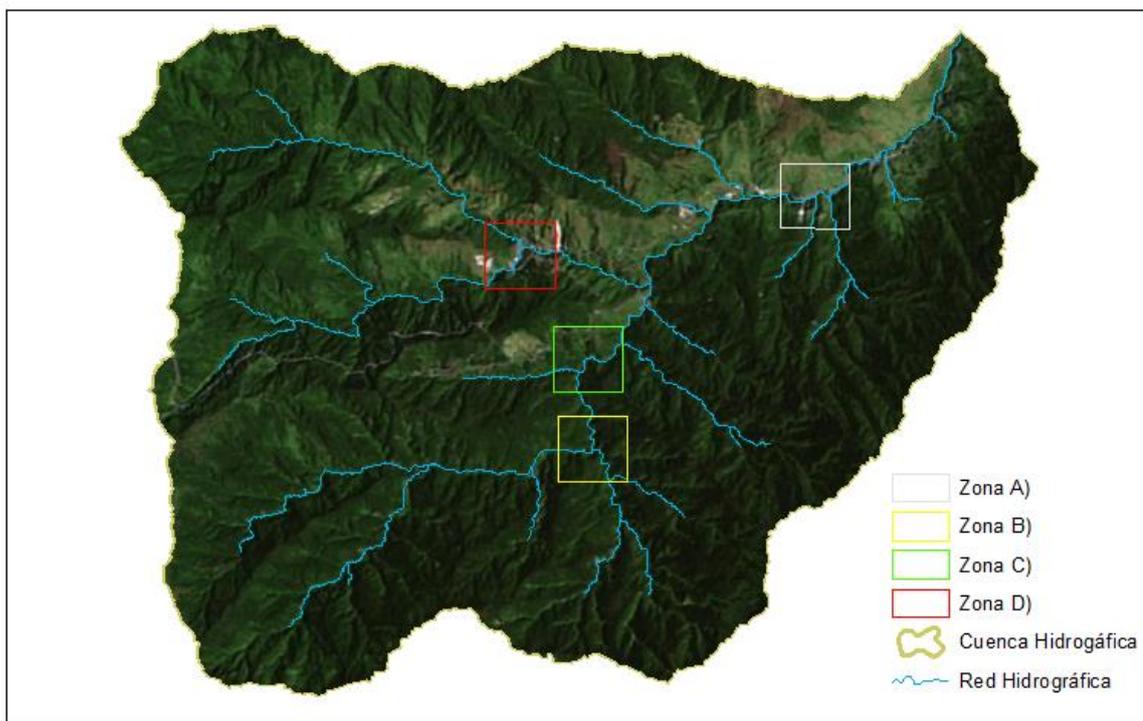
En la Figura 56, con una resolución de 12,5 m se observa que el MDE de ALOS PALSAR (AP) linealiza ciertos tramos que describe LiDAR (B, C) de la red. Para una resolución de 30 m, los MDE de ASTER y SRTM (Fig. 57), no siguen el cauce real mostrado por LiDAR (A, C, D). Pero ALOS PALSAR, es el que mejor representa la sinuosidad de los cauces.

Para una resolución de 50 m, se observa que las redes se distorsionan con respecto a la red de comparación. La red generada por LiDAR, sigue una representación real de los cauces (Fig. 58). Pero, para la resolución de 75 m. las redes se desvían de manera significativa (Fig. 59). Además, en la zona A, SRTM representa una mejor delineación de los cauces en comparación a LiDAR en esa misma resolución.

En general los MDE de ASTER, generan redes más lineales, es decir, no pueden detectar las irregularidades del río. Las redes de SRTM, muestran una mejor representación de las redes en resoluciones de 50 m y 75 m. Mientras que, ALOS PALSAR muestra una mejor representación de los cauces en resoluciones de 12.5 m y 30 m. Por lo tanto, de acuerdo a la observación visual, las resoluciones entre 12.5 m y 30 m generan redes que representan mejores características en la delineación de los cauces.

En el anexo 7 se adjunta la red de drenaje completa del área de estudio para los diferentes tamaños de píxel o resoluciones

COMPARACIÓN VISUAL DE LA RED



REDES
LiDAR_5

REDES
LiDAR_5

Figura 55. Comparación visual de las redes de drenaje (Zonas).
Fuente / Elaboración: El Autor.

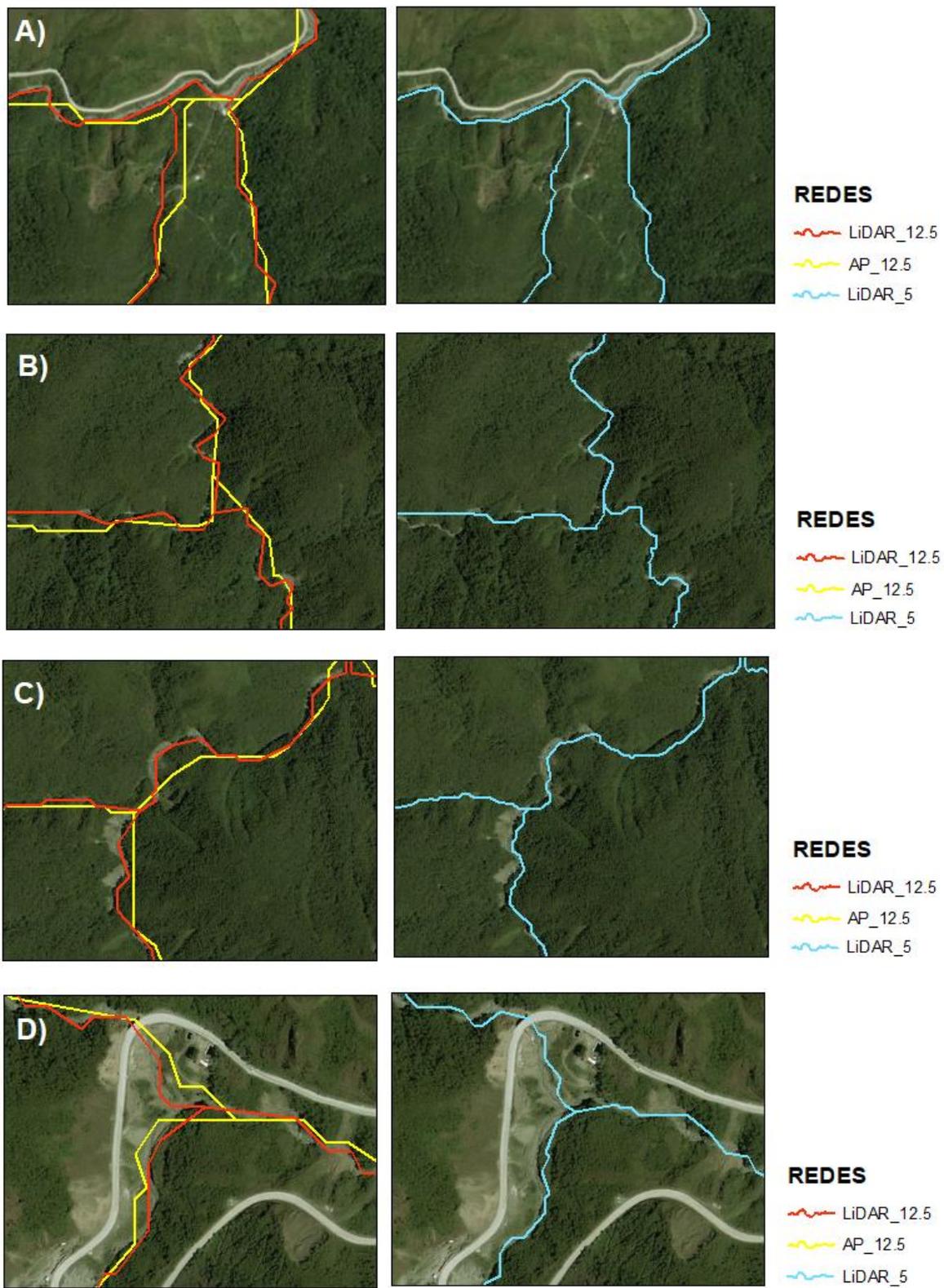


Figura 56. Comparación visual de las redes de drenaje (12.5 m).
Fuente / Elaboración: El Autor.

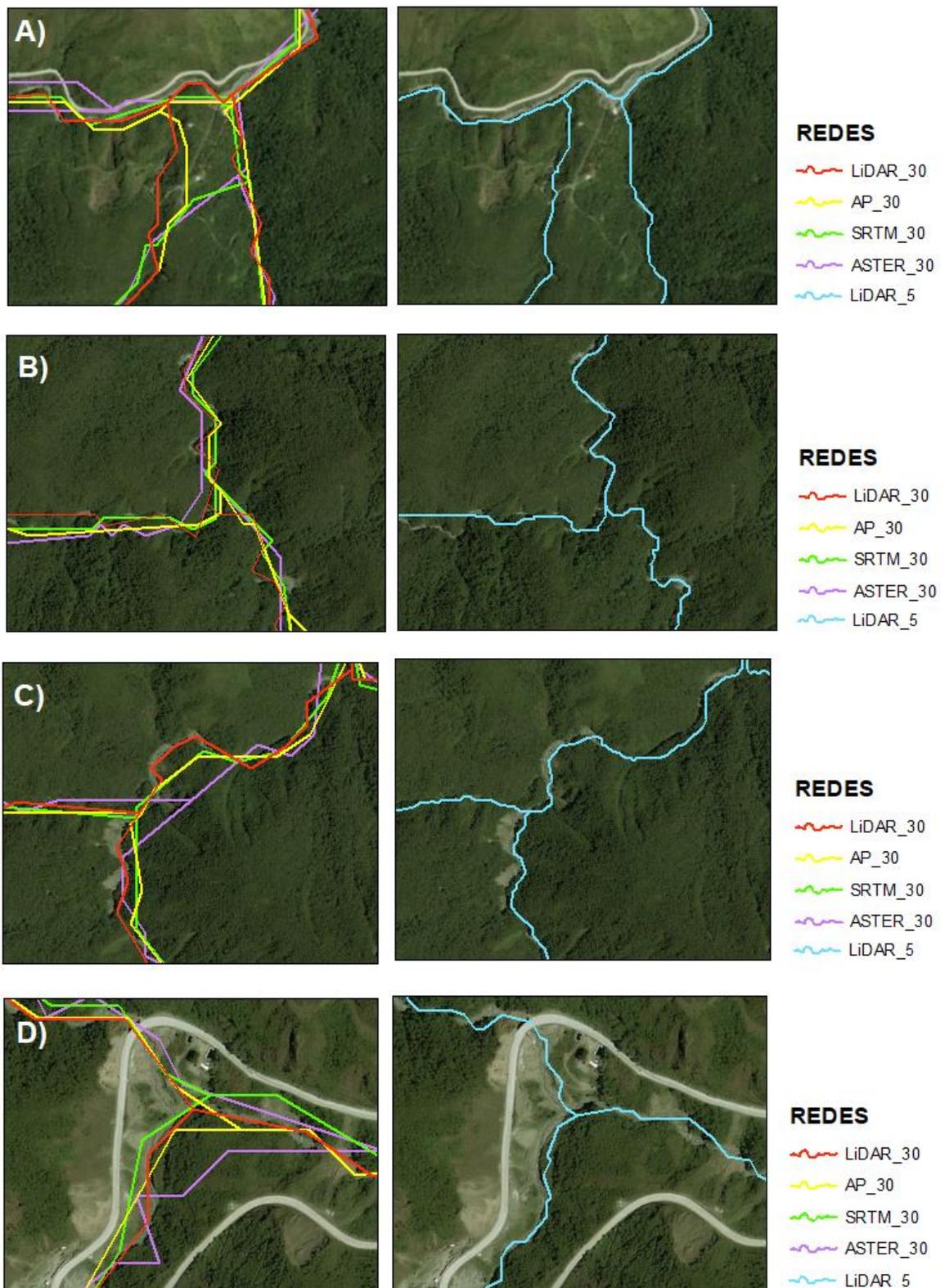


Figura 57. Comparación visual de las redes de drenaje (30 m).
Fuente / Elaboración: El Autor.

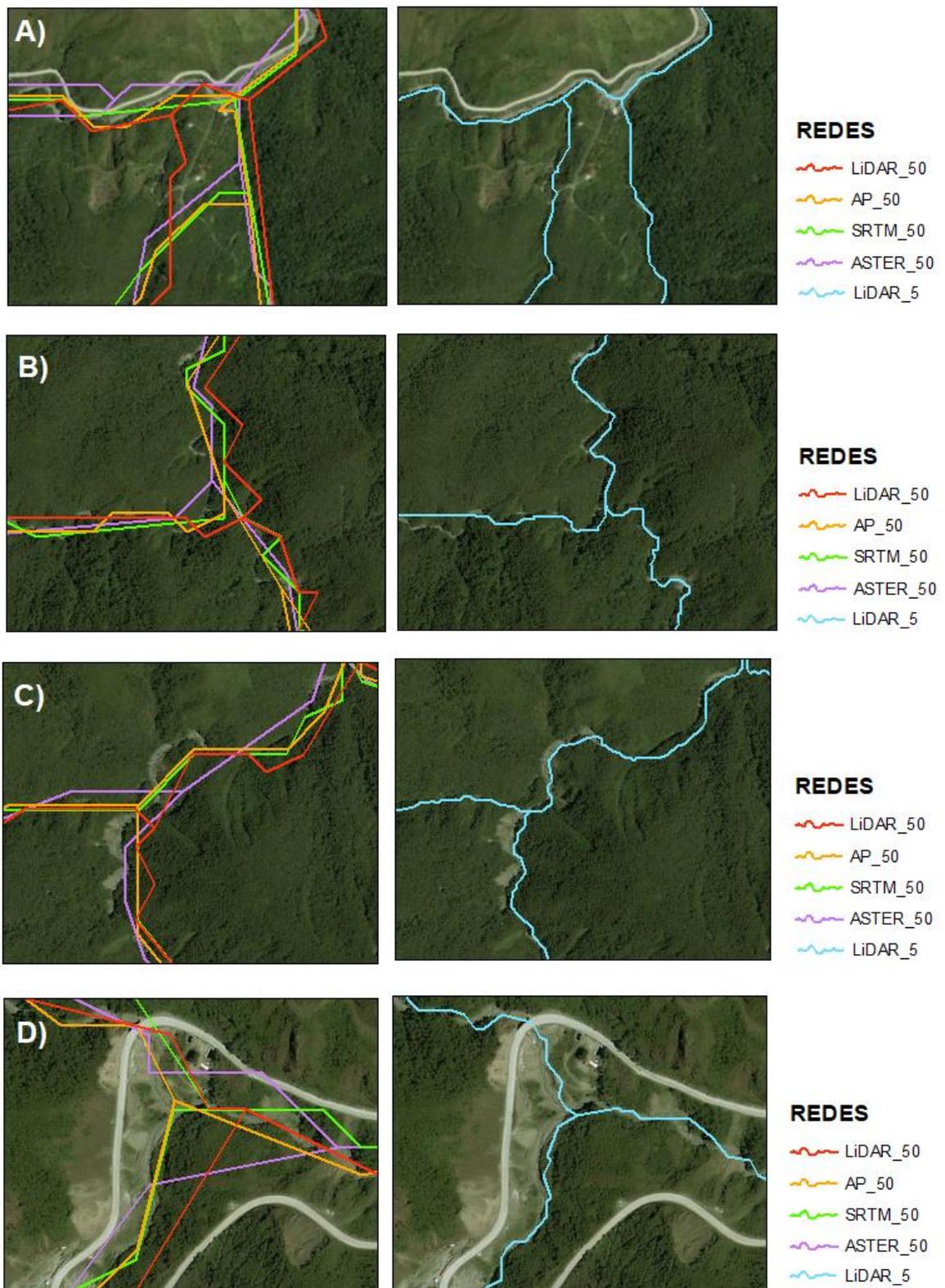


Figura 58. Comparación visual de las redes de drenaje (50 m).
Fuente / Elaboración: El Autor.

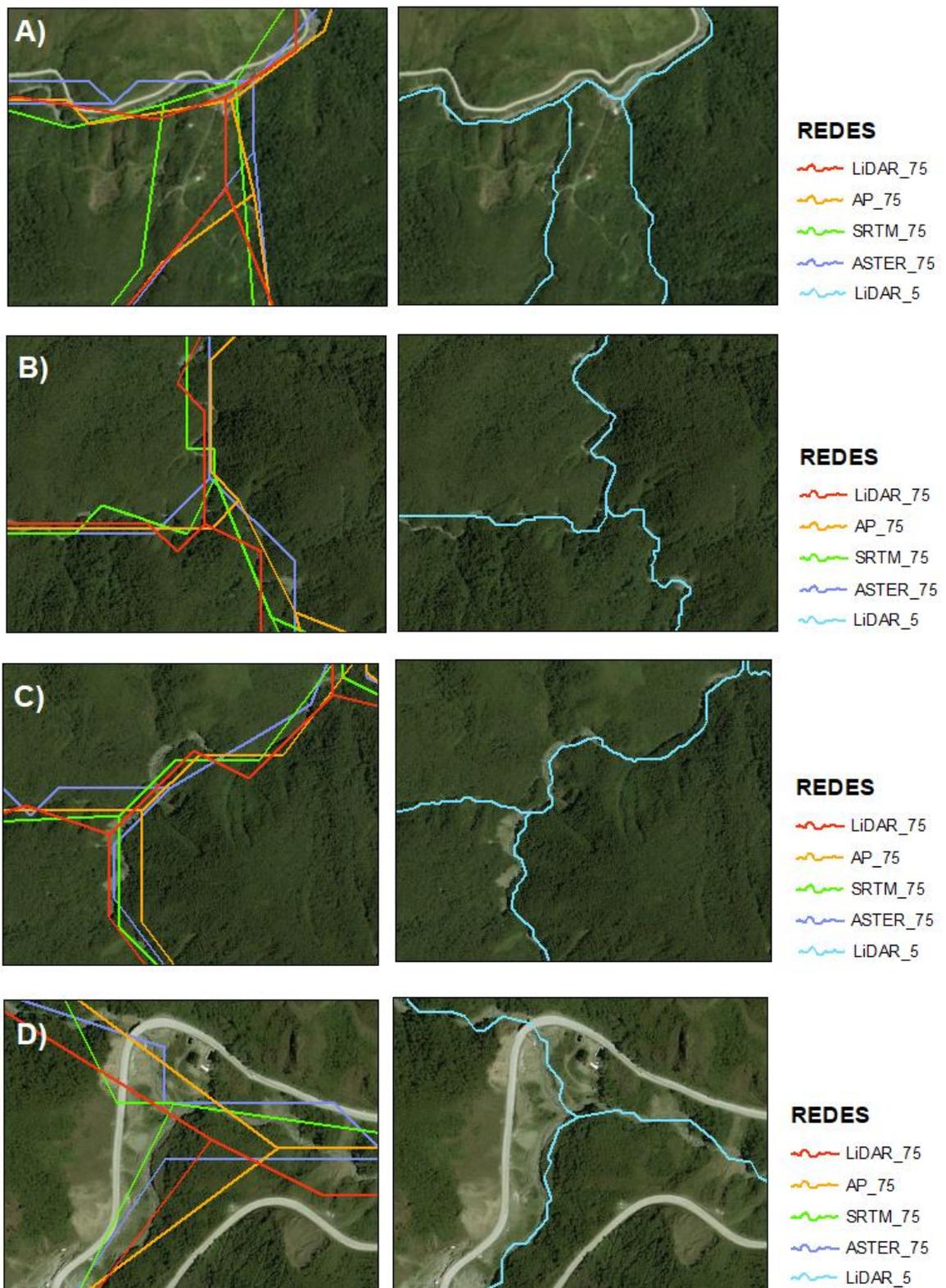


Figura 59. Comparación visual de las redes de drenaje (75 m).
Fuente / Elaboración: El Autor.

Para analizar la comparación visual de las redes, se establece un coeficiente de determinación (R^2) entre los MDE satelitales y el MDE de LiDAR, este último se considera como representación más cercana a la realidad. Las redes que tienen una mayor correlación comparado con los datos LiDAR, representan correctamente los cauces. Para el análisis se utilizó el principio de Multifractal Box Counting, lo cual divide a la red en cuadrados y cuenta los píxeles de cada cuadrado que son parte de las redes generadas. Si el número de píxeles es similar o cercano a los píxeles de LiDAR el coeficiente de determinación (R^2) es más alto, es decir se acerca al valor de 1.

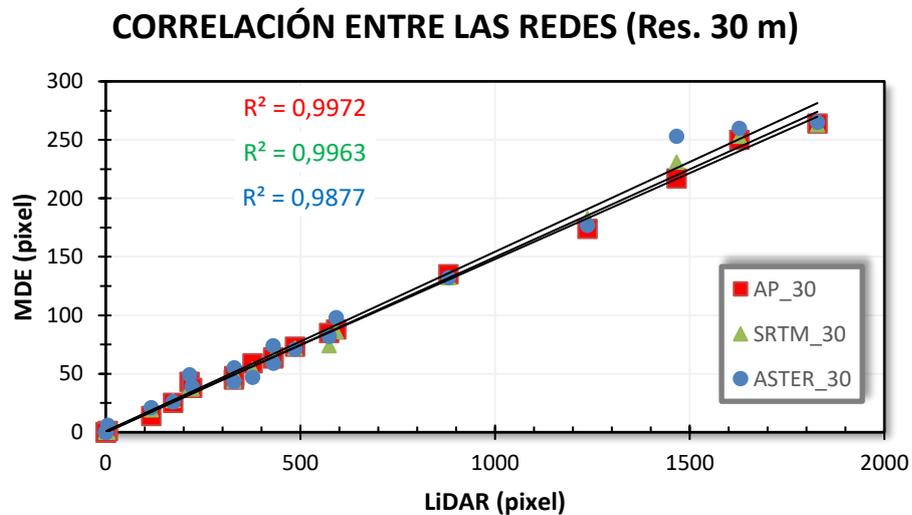


Figura 60. Correlación entre las redes de drenaje (30 m)
Fuente / Elaboración: El Autor.

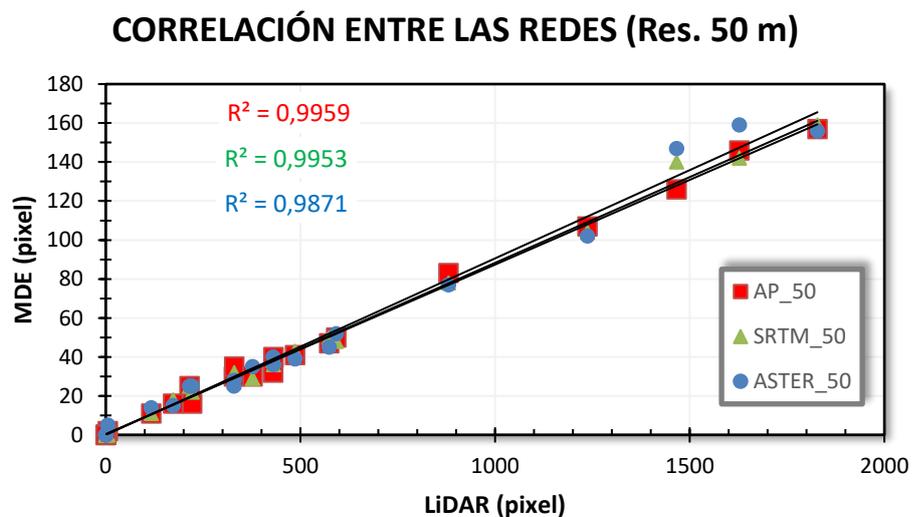


Figura 61. Correlación entre las redes de drenaje (50 m)
Fuente / Elaboración: El Autor.

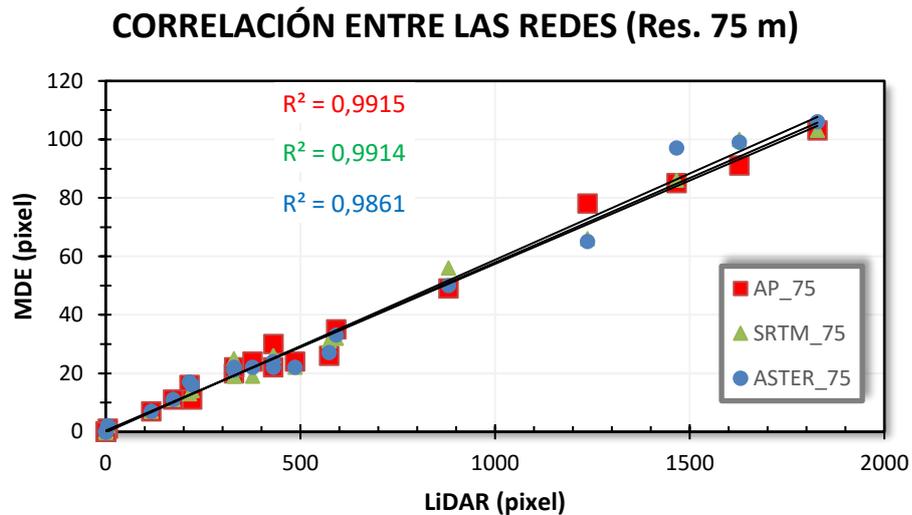


Figura 62. Correlación entre las redes de drenaje (75 m)
Fuente / Elaboración: El Autor.

Para la resolución de 30 m, las redes generadas por ALOS PALSAR representan mayor similitud en la cantidad de píxeles que componen la red de comparación (LiDAR; Fig.60). Además, para resoluciones de 50 m y 75 m, ALOS PALSAR se adaptan mejor a LiDAR. (Fig. 61 y 62). Las redes generadas por ASTER muestran el coeficiente de determinación (R^2) más bajo para todas las resoluciones, es decir la red de drenaje no representa las características reales respecto a LiDAR.

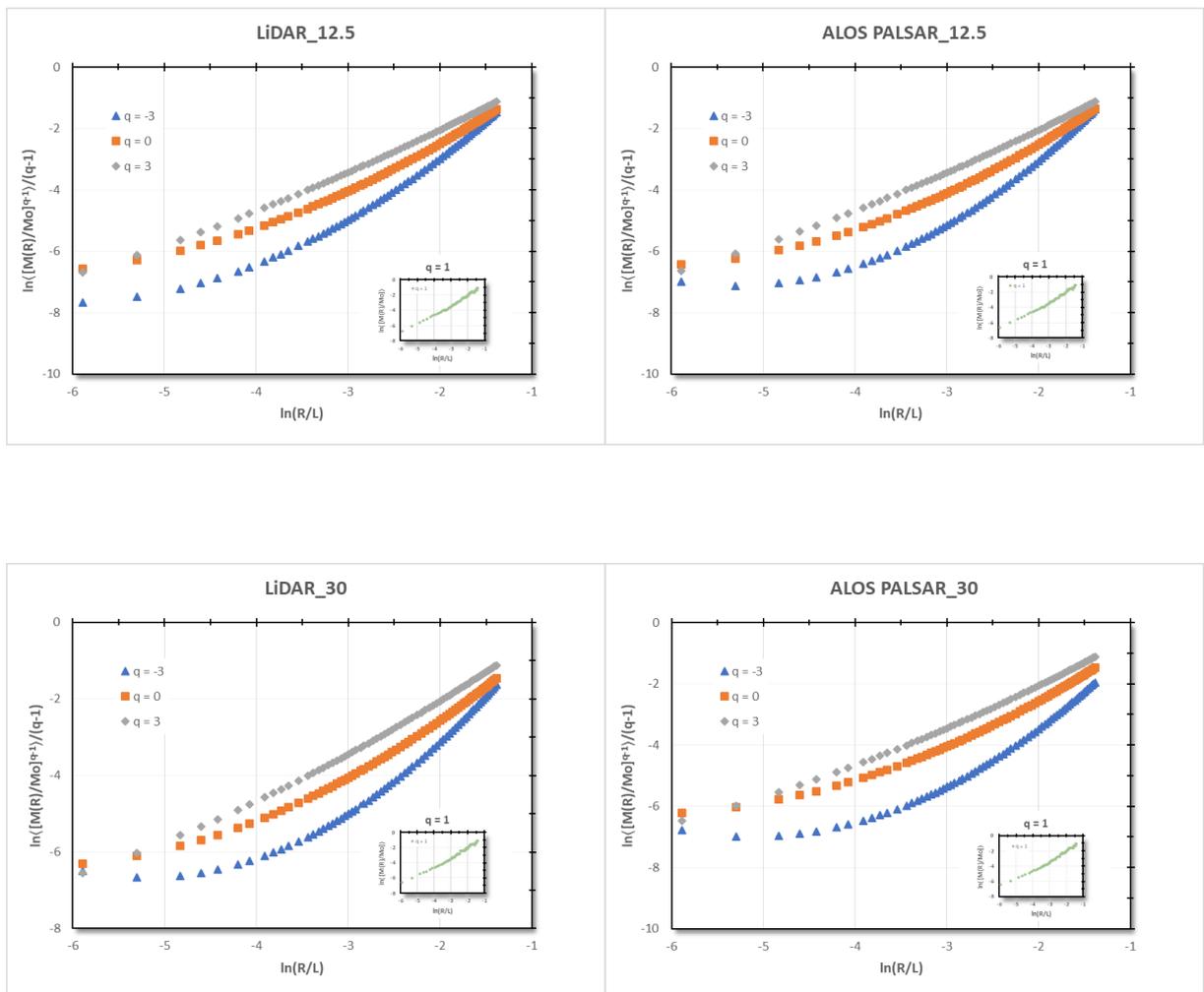
4.6. Análisis Multifractal Sand-box:

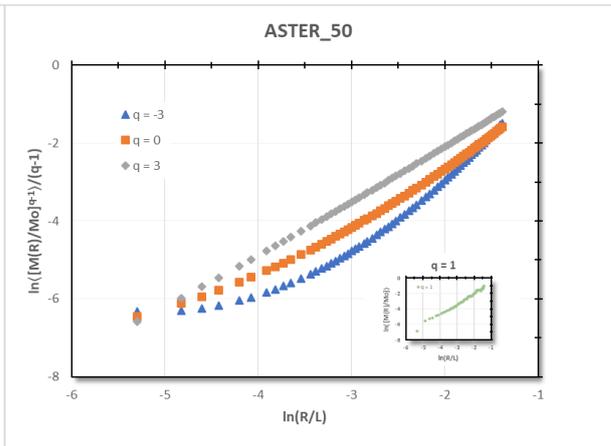
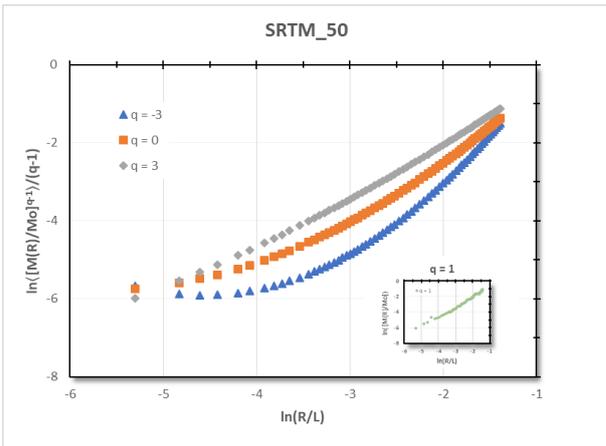
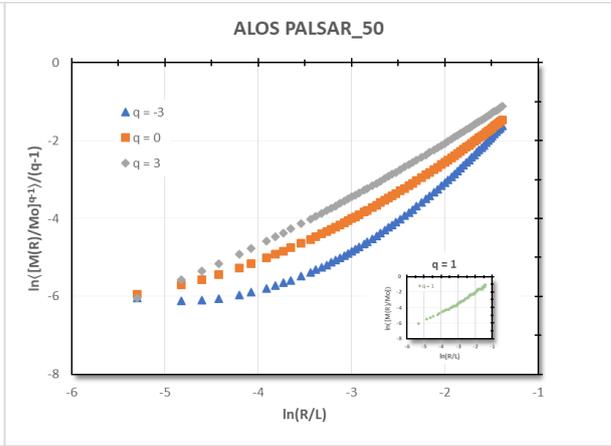
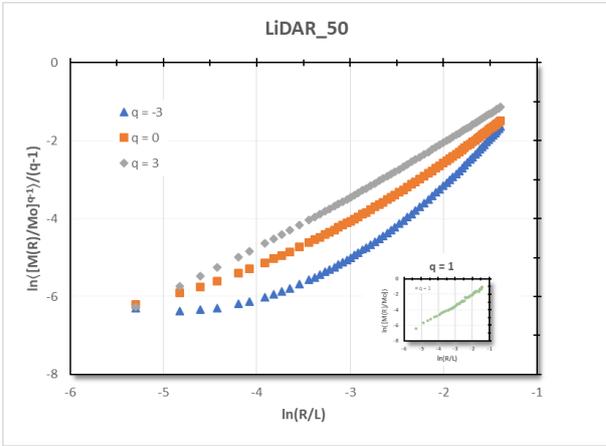
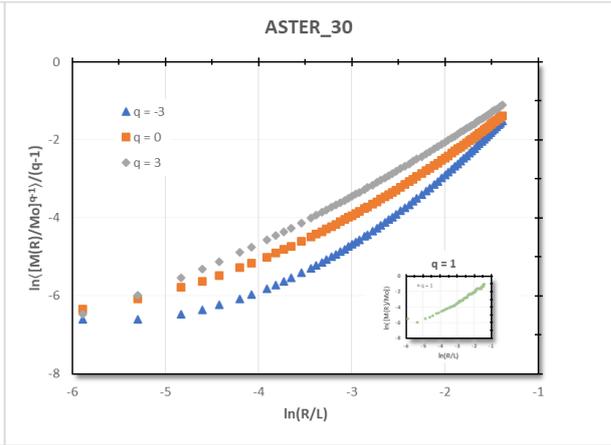
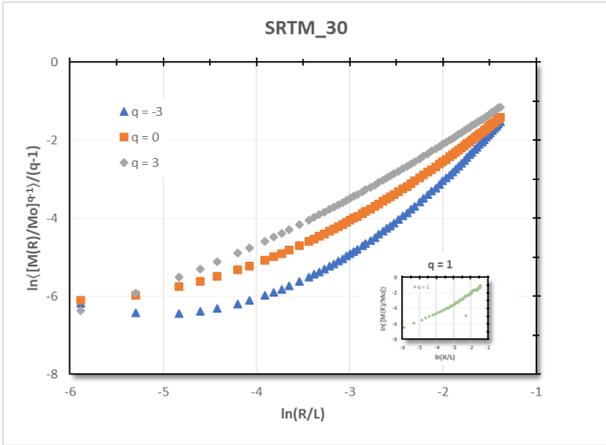
Con el fin de estudiar la topología de las redes más precisas, se aplica la geometría fractal, comprobando las redes generadas de los MDE satelitales con LiDAR. La red de drenaje generada en base a los datos LiDAR se considera como una representación más exacta de los cauces.

La geometría fractal examina la idoneidad de la morfología de redes fluviales generadas por el algoritmo D8, comparando los datos LiDAR con las redes obtenidas de los MDE de ALOS PALSAR, SRTM y ASTER a diferentes tamaños de píxel (12.5, 30, 50, 75) m. Para conseguir resultados independientes en la generación de la red en cada resolución, se utilizó 1% del umbral de acumulación máxima de flujo de la cuenca formada. Se aplicó el método Multifractal Sand-box para determinar el espectro de Renyi de las redes. Al comparar los espectros se

usó el Error Cuadrático Medio (ECM), determinando la fuente de datos más adecuada en la generación de la red hídrica de acuerdo a tamaño de píxel y la similitud entre las redes.

El algoritmo Sand-box, genera las curvas de escala, las mismas que permiten calcular las dimensiones fractales para los momentos estadísticos " q " $\in [-3,3]$, porque aplicando intervalos mayores, los momentos producen una amplificación de los resultados (Zelege y Cheng, 2005). Las curvas de escala presentan una serie de puntos para los valores de " q ", de los cuales se calcula las diferentes dimensiones fractales (Fig. 63). Para $q = 0$ los puntos se ajustan mejor a una regresión lineal entre el límite inferior $(R/L)_{min}$ y el superior $(R/L)_{máx}$ obteniendo así el coeficiente R^2 que se muestra en la Tabla 17 (Ariza-Villaverde et al., 2013).





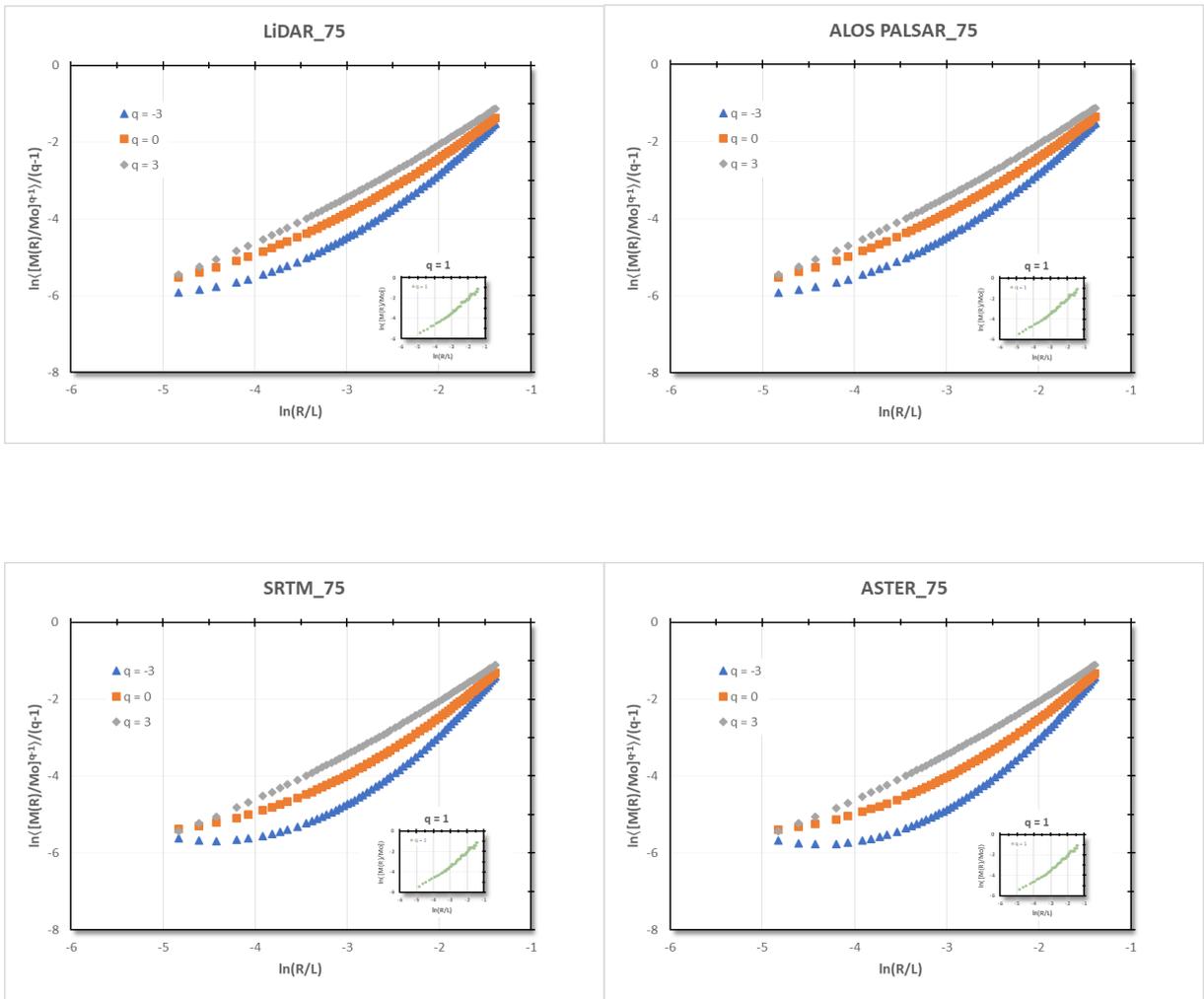


Figura 63. Curvas de escala.

Fuente / Elaboración: El Autor.

El espectro de Renyi considera valores máximos y mínimos para la relación R/L comprendidos entre 0,25 y 0,0028 respectivamente. La elección de estos valores busca al menos dos píxeles de la red que forman un círculo, de los cuales uno de los píxeles es el centro. Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 17. El valor del ECM más bajo de cada resolución indica el MDE más apropiado para la generación de la red hídrica y los valores subrayados, representa los MDE satelitales con menor error. Los MDE generados en base de los datos LiDAR, presentan los ECM más bajos para todas las resoluciones, indicando que los MDE de LiDAR son los más apropiados para cada tamaño de píxel. De los MDE satelitales el ALOS PALSAR presenta buenas características para las resoluciones de 12.5 m y 30 m, mientras que SRTM presenta mejores características para 50 m y 75 m.

Tabla 17. Error Cuadrático Medio.

	LiDAR	ALOS PALSAR	SRTM	ASTER
12.5 x 12.5	0,3290	<u>0,3857</u>	-	-
30 x 30	0,4234	<u>0,4270</u>	0,4348	0,4608
50 x 50	0,3505	0,3704	<u>0,3511</u>	0,3556
75 x 75	0,2570	0,3211	<u>0,3001</u>	0,3116

Fuente / Elaboración: El Autor.

De acuerdo a la Figura 64 (tomado de la Tabla 17), los valores del EMC obedecen a una tendencia decreciente a partir de 30 m. Para resoluciones altas el ECM será mayor. En resoluciones de 12.5 m., LiDAR y ALOS PALSAR presentan valores similares a la resolución de 50 m.

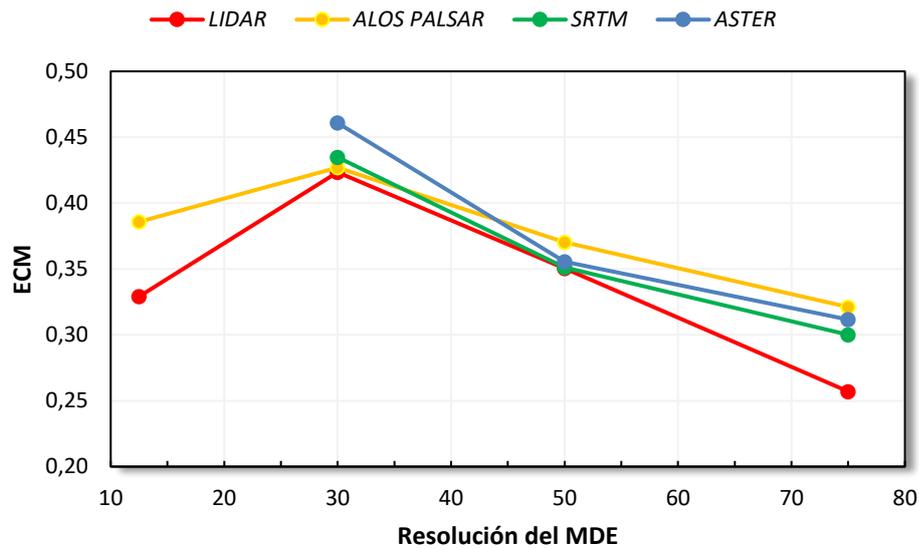


Figura 64. Error Cuadrático Medio.

Fuente / Elaboración: El Autor.

En la Figura 65, los espectros de Renyi, provenientes de los MDE. Los espectros tienen una tendencia decreciente, indicando que cumple con la condición de multifractalidad $D_0 > D_1 > D_2$ de las redes de drenaje:

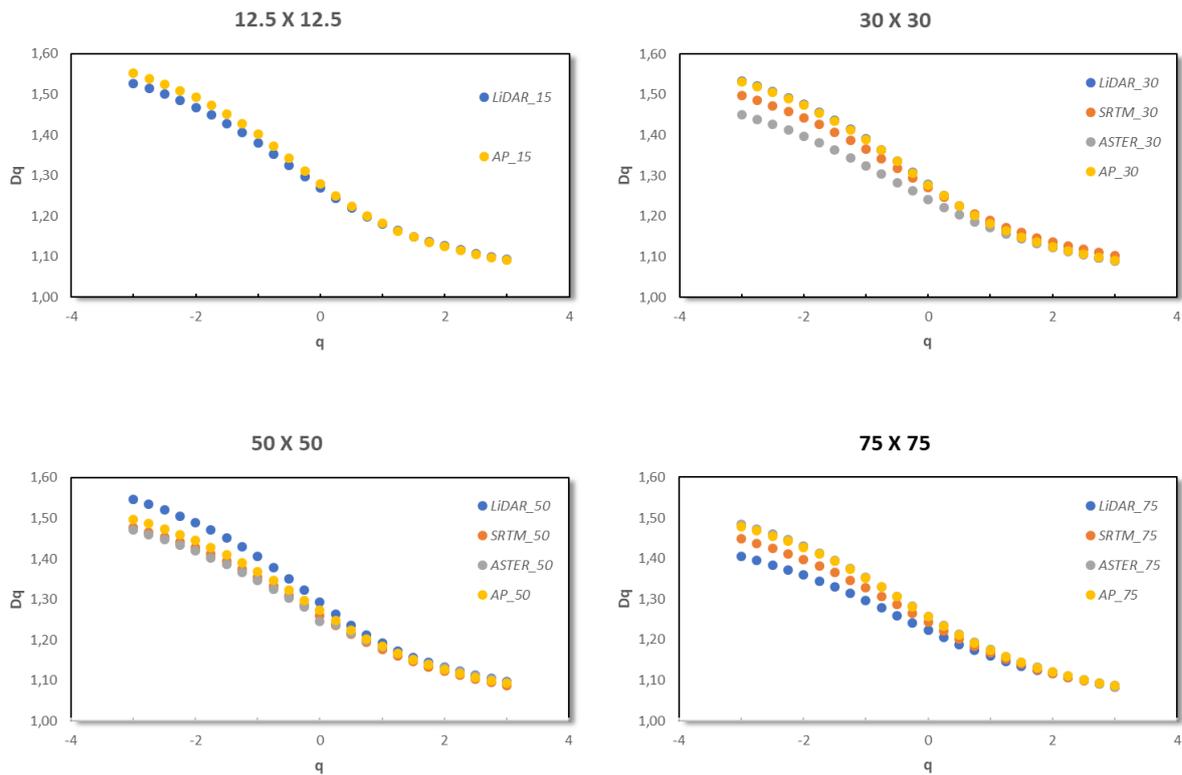


Figura 65. Espectro de Renyi.
Fuente / Elaboración: El Autor.

Los espectros de Renyi, en tamaños de píxel o resolución espacial de 12,5 m, casi se superponen para momentos positivos “ q ”, indicando que los MDE (LiDAR y ALOS PALSAR) tienen patrones similares en zonas donde la red es densa, mientras que los momentos negativos (parte izquierda) indican que los patrones difieren en zonas donde la red no es muy densa.

Los MDE de resolución espacial de 30 m y 50 m presentan espectros de Renyi, sobrepuestos en la parte derecha de la curva, cuando los momentos estadísticos son positivos. Esto significa que existen analogías en zonas donde las redes de drenaje son más densas. En la parte izquierda (momentos estadísticos negativos) se observa una ligera diferencia entre las curvas, indicando una menor similitud entre los MDE donde las redes de drenaje son menos densas. En el caso del espectro para un tamaño de píxel de 75 m, se presenta una marcada diferencia de las redes en zonas menos densas (izquierda) y en las zonas más densas, las redes presentan una semejanza (derecha).

A partir de los espectros de Renyi se determina los parámetros multifractales, que incluyen: la dimensión fractal para $q = 0$, donde D_0 hace referencia al grado en que las redes de drenaje cubren espacios asociados a la densidad de las redes generadas y orden de corrientes; D_1

proporciona una medida del grado de heterogeneidad en la distribución espacial de las redes y caracteriza la distribución e intensidad de las singularidades con respecto a la media. Un valor bajo representa una distribución de la red con singularidades uniformes a lo largo de la cuenca, caso contrario serán heterogéneas; D_2 proporciona la probabilidad de encontrar píxeles de la red dentro de los círculos generados.

La ecuación ($W = D_{-3} - D_3$) describe el grado de multifractalidad del espectro de Renyi. Un valor mayor representara una red heterogénea, un valor bajo una red homogénea (Ariza-Villaverde et al., 2013; Zeleke Cheng, 2005). De las redes analizadas se obtuvieron los siguientes parámetros (Tabla 18):

Tabla 18. Parámetros multifractales del área de estudio

	D_0	D_1	D_2	$W=D_{-3} - D_3$	R/Lower	R/Lupper	R^2	Net Points
LIDAR_12.5	1,2690	1,1814	1,1266	0,4340	0.0028	0.25	0,9434	4336
AP_15	1,2797	1,1818	1,1251	0,4604			0,9242	4064
LIDAR_30	1,2790	1,1827	1,1246	0,4438	0.0028	0.25	0,9603	1742
AP_30	1,2761	1,1826	1,1249	0,4397			0,9444	1686
SRTM_30	1,2699	1,1892	1,1362	0,3942			0,9455	1691
ASTER_30	1,2268	1,1714	1,1222	0,3618			0,9446	1757
LIDAR_50	1,2926	1,1929	1,1331	0,4477	0.005	0.25	0,9263	1020
AP_50	1,2726	1,1845	1,1273	0,4046			0,9103	994
SRTM_50	1,2602	1,1773	1,1228	0,3880			0,9261	1002
ASTER_50	1,2455	1,1829	1,1273	0,3753			0,9252	1025
LIDAR_75	1,2227	1,1599	1,1160	0,3186	0.008	0.25	0,9496	660
AP_75	1,2573	1,1749	1,1202	0,3929			0,9317	655
SRTM_75	1,2429	1,1687	1,1167	0,3655			0,9376	658
ASTER_75	1,2578	1,1760	1,1204	0,4007			0,9336	663

Fuente / Elaboración: El Autor.

Los espectros de Renyi se calcularon para las diferentes resoluciones de los MDE LiDAR, ALOS PALSAR, ASTER y SRTM. Se escogió los valores que presentaban un menor ECM indicando una mejor distribución de las redes respecto a las generadas por LiDAR, considerando que éstos datos son más precisos.

En función al análisis realizado de los diferentes parámetros morfométricos, e inspección visual de las redes generadas, se contrasta los resultados con el análisis multifractal. A continuación, se presenta la Tabla 19, donde se describe los MDE que mejor se ajustan para los parámetros analizados y sus resoluciones.

Tabla 19. MDE adecuado para cada resolución en los parámetros analizados.

PARÁMETRO \ RESOL.	30 m	50 m	75 m
PARÁMETROS MORFO.	SRTM / ALOS P.	SRTM / ALOS P.	SRTM / ALOS P.
INSPECCIÓN VISUAL	ALOS PALSAR	SRTM	SRTM
CORRELACIÓN	ALOS PALSAR	ALOS PALSAR	ALOS PALSAR
MULTIFRACTAL	ALOS PALSAR	SRTM	SRTM
RESULTADO	<i>ALOS PALSAR</i>	<i>SRTM</i>	<i>SRTM</i>

Fuente / Elaboración: El Autor.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

Durante el desarrollo de la tesis, se ha considerado temas importantes, que además han generado nuevas inquietudes y alternativas de investigación, que podrían ser objeto de interés:

Uno de los puntos críticos en el desarrollo de la investigación ha sido la validación de los resultados, es por eso que se podría generar una investigación donde sea necesario un trabajo de campo, que detalle las principales variaciones del terreno, utilizando un DGPS con el fin de determinar cuál de los MDE representa un mejor resultado comparativo a este trabajo.

Realizar una evaluación de las fuentes de MDE en diferentes zonas (bajo relieve).

Generar una metodología estándar para validar los resultados acordes a los MDE relacionados a Ingeniería Civil.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación, se ha generado Modelos Digitales de Elevación (MDE) a partir de datos LiDAR y se han comparado con otras fuentes que proporcionan MDE. Las fuentes son satelitales (ALOS PALSAR, ASTER, SRTM), de alcance global y de libre distribución. Para lo cual se realizó un análisis comparativo en función a las características que describen los parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica, con diferentes resoluciones de los MDE.

Un MDE con gran detalle, constituye el principal insumo para estudios relacionados a la Ingeniería Civil como diseño vial, agua potable, alcantarillado, riego, hidroeléctricas entre otros. Pero en la hidrología superficial, el nivel de detalle es muy importante debido a que proporciona una caracterización minuciosa de la red de drenaje. La disponibilidad de un MDE con gran resolución para grandes extensiones de terreno es limitado y costoso. Una de las alternativas es recurrir a fuentes satelitales disponibles para la zona de estudio; entre estas, tenemos: SRTM, ASTER, y ALOS PALSAR que generan los MDE a una resolución espacial original de 30 m, 30 m y 12,5 m respectivamente.

El uso de datos LiDAR aéreo para generar MDE en investigaciones, consultorías o proyectos donde se requiera el levantamiento topográfico del terreno con gran precisión es muy costoso. Pero en grandes extensiones permite obtener valiosa información actualizada de las características tanto superficiales como las de terreno. Entre otros factores que influyen para obtener un MDE con precisión son: la densidad de puntos que emite el sensor LiDAR, la superficie, y el proceso de filtrado.

Respecto a las características de los MDE de fuentes satelitales. ASTER tiene una mayor cobertura terrestre (83°N - 83°S). Pero, ALOS PALSAR posee una precisión vertical similar a SRTM (16 m), mejor que ASTER. Y la mayor precisión horizontal corresponde a ALOS PALSAR (10 m).

Para determinar MDE a partir de datos LiDAR, se utilizó el software libre denominado FUSION. Aplicando algoritmos, permitió filtrar los puntos que no pertenecen al terreno, mostrando una nube de puntos con densidad baja (menor a 0,20 puntos por metros cuadrado). También se empleó un procesamiento a los MDE de fuentes satelitales (relleno de datos, resampleo), que permitió mejorar la obtención de los parámetros morfométricos. Respecto al análisis multifractal se lo aplicó como una herramienta de verificación numérica entre las redes

generadas por LiDAR y los MDE de fuentes satelitales. La metodología utilizada es factible para los modelos matemáticos empleados, porque generan resultados similares en todos los procesos.

En el análisis de los parámetros morfométricos. La variación del área y perímetro; LiDAR considera la forma original del terreno, mientras que en los demás MDE se incrementan sus valores, porque las señales de sus ondas no penetran directamente al terreno, presumiendo a que existe una interferencia debido a la presencia de nubes en la parte alta de la cuenca. En el caso de la longitud total y orden de drenaje, una mayor longitud se da en resoluciones mayores (píxeles de menor tamaño), porque los píxeles permiten generar cauces con mayor detalle (sinuosidad); mientras que el orden de drenaje también está influenciado por el relieve y el valor del umbral de acumulación.

En los parámetros de relieve, la pendiente media se incrementa en resoluciones mayores del MDE. LiDAR muestra una pendiente mayor debido a que representa la superficie más realista del terreno y los otros MDE indican una elevación ponderada entre el terreno y la cobertura. Por consiguiente, la pendiente de la cuenca esta mejor representada en tamaños de píxel entre 12.5 m y 30 m. El perfil del cauce principal sobre estima los valores de elevación en los MDE satelitales, aproximadamente a partir de los 2100 m.s.n.m., siendo esta una consideración especial para el uso de estos MDE en las diversas aplicaciones.

La distribución de la red hídrica indica que el MDE ASTER presenta una diferencia significativa en la representación de cauces respecto a LiDAR. Existiendo una similitud entre los resultados de ALOS PALSAR Y SRTM.

En esta investigación se aplicó el análisis multifractal Sand-box a las redes de drenaje, para evaluar los efectos de la resolución de los MDE sobre las fuentes que proporcionan los mismos. De acuerdo a los resultados obtenidos, el uso de altas resoluciones en MDE se ajustan a las características del terreno proporcionando redes de drenaje precisas. El análisis multifractal resulta ser una herramienta idónea para el estudio de la precisión con que las redes de drenaje son generadas a partir del algoritmo D8, además tiene la ventaja que sus parámetros son independientes de la escala de estudio. Pudiendo concluir que los MDE de mayor resolución (LiDAR y ALOS PALSAR) permiten generar una mejor red de drenaje en base al umbral de acumulación del 1% para zonas montañosas (Área de estudio). Se muestra que SRTM también es válido para las resoluciones de 50 m y 75 m.

Finalmente, de acuerdo la investigación se concluye que si no se dispone de MDE de alta resolución (como LiDAR). Se puede utilizar MDE de fuentes satelitales como ALOS PALSAR y SRTM, los mismos que generan características morfométricos más adecuadas respecto a

su resolución original de 12.5 m y 30 m respectivamente. En cuanto a la generación de redes de drenaje para uso en estudios hidrológicos o estudios afines, un MDE con resolución espacial de hasta 30 m, permite representar los cauces en forma adecuada, para zonas montañosas (similares al área de estudio del presente trabajo).

En general, un MDE con una resolución mayor conlleva a un gasto elevado de adquisición. Pero representa de mejor manera la superficie y los segmentos de los ríos. De igual manera se debe considerar el uso o las variables que se necesiten extraer de los MDE, los mismos son determinantes al momento de elegir la fuente de datos de elevación y su resolución.

RECOMENDACIONES:

Es necesario analizar las especificaciones de los MDE que permitan relacionar la mejor opción para ajustarse al requerimiento de las variables que se necesitan extraer.

Realizar una validación de campo para establecer la precisión de los diferentes MDE usando dispositivos de precisión como GPS diferenciales de doble frecuencia (DGPS) o estación total, usando puntos de control establecidos y redes geodésicas (IGM).

Usar los MDE (LiDAR) con alta precisión en zonas de difícil acceso o en donde se requiera información detallada de la superficie.

Tener un grado de pericia, habilidad, conocimiento de quien realiza la medición y procesamiento de información, a fin de evitar errores en el cumplimiento de esta actividad.

Se debe profundizar en la investigación de temas relacionados a la presente tesis, por cuanto las nuevas tecnologías requieren de una investigación más avanzada y actualizada.

BIBLIOGRAFÍA

- Abrams, M., Tsu, H., Hulley, G., Iwao, K., Pieri, D., Cudahy, T., & Kargel, J. (2015). The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) after fifteen years: Review of global products. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38, 292–301. <http://doi.org/10.1016/j.jag.2015.01.013>
- Aguirre, N. (2007). *Manual Para El Manejo Sustentable de Cuencas Hidrograficas*. UNL. Loja.
- Alonso, C. (2009). Introduction to the Fractals. Cataluña: Universidad Politecnica de Cataluña.
- ALTITUM. (2017). Geología y Geotécnia – Proveedores de servicios de información geográfica en Ecuador. Áltitum Cia. Ltda. Retrieved September 17, 2017, from <http://www.altitum.com/fotografia-aerea-digital>
- Aparicio, J. (1992). *Fundamentos De Hidrología De Superficie*. *Journal of Chemical Information and Modeling* (1º Edición, Vol. 53). Mexico. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Arbelo, D. M. (2012). Introducción a la Teledetección Concepto de teledetección: Elementos de un proceso de Teledetección detalles históricos, 1–3. Retrieved from <https://marbelo.webs.ull.es/>
- Ariza-Villaverde, A. B., Jiménez-Hornero, F. J., & Gutiérrez de Ravé, E. (2013). Multifractal analysis applied to the study of the accuracy of DEM-based stream derivation. *Geomorphology*, 197, 85–95. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.04.040>
- Ariza Villaverde, A. B. (2013). *Descripción multifractal de redes antrópicas y naturales*. Universidad de Córdoba. Retrieved from <http://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/9364>
- Armijos, J. (2016). *Análisis regional de las relaciones entre la geometría del cauce lleno de ríos de montaña con las características morfo métricas de la cuenca drenante. Caso de estudio zona Interandina del sur del Ecuador*. UTPL.
- Arranz, J. J. (2013). Diseño, optimización y análisis de sistemas basados en técnicas láser, para el modelado geométrico, registro y documentación, aplicados a entidades de interés patrimonial. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía.
- Arranz Justel, J. J., Ormeño Villajos, S., & Vicent García, J. M. (2012). Algoritmo para la clasificación de nubes de puntos LiDAR en entornos urbanos: discriminación entre

vegetación y edificaciones. *I Congreso Iberoamericano de Geomática Y Ciencias de La Tierra. X Topcart 2012.*

- Avtar, R., Yunus, A. P., Kraines, S., & Yamamuro, M. (2015). Evaluation of DEM generation based on Interferometric SAR using TanDEM-X data in Tokyo. *Physics and Chemistry of the Earth*, 83–84(September), 166–177. <http://doi.org/10.1016/j.pce.2015.07.007>
- Azor Montoya, J. R. (2013). Ejemplo de aplicación de la Dimensión Fractal en Medicina El. Universidad de Mendoza - Argentina.
- Bakua, K., Dominik, W., & Ostrowski, W. (2014). Verification and improving planimetric accuracy of airborne laser scanning data with using photogrammetric data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(3W1), 21–26. <http://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W1-21-2014>
- Baron, R. A., & Byrne, D. (2003). Intro to advanced GIS and a review of basic GIS.
- Bartolo, S. G. De, & Gabriele, S. (2004). A new method for the assessment of river network fractal dimensions: introduction, computation and comparison. In *Proceedings of the second international conference on fluvial hydraulics "River Flow 2004"* (pp. 75–81). Naples, Italy. <http://doi.org/https://doi.org/10.1201/b16998-11>
- Bater, C. W., & Coops, N. C. (2009). Evaluating error associated with LiDAR - derived DEM interpolation. *Computers and Geosciences*, 35(2), 289–300. <http://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.09.001>
- Baugh, C. A., Bates, P. D., Schumann, G., & Trigg, M. A. (2013). SRTM vegetation removal and hydrodynamic modeling accuracy. *Water Resources Research*, 49(9), 5276–5289. <http://doi.org/10.1002/wrcr.20412>
- Bazílio, S., Souza, C. H. W. de, Wrublack, S. C., Mercante, E., & Vilas Boas, M. A. (2013). Delimitação automática da microbacia hidrográfica do Rio das Lontras, através de dados SRTM. *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, 5515–5522.
- Breña, A., & Jacobo, M. (2006). Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial. *Universidad Autónoma Metropolitana*, 288.
- Burgos, V. (2012). Evaluación de ASTER GDEM y SRTM-C / X para modelación hidráulica de la rotura de la presa El Carrizal, Mendoza. *Instituto Nacional Del Agua - Centro Regional Andino*, 16. Retrieved from http://www.ina.gov.ar/pdf/ifrrhh/03_003_Burgos.pdf
- Cabrera Guarinos, J. (2013). *Estimación de variables dasométricas a partir de datos lidar pnoa*

- en masas regulares de pinus halepensis, daroca (Zaragoza)*. Universidad de Zaragoza.
- Cahuana, A. A., & Yugar, M. W. (2009). *Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de Hidrología Civ-233*. Cochabamba: Universidad Mayor de San Simón.
- Caldwell, M. M., Heldmaier, G., Jackson, R. B., Lange, O. L., Mooney, H. a, Schulze, E., & Sommer, U. (2007). Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador. *Ecological Studies*, 198.
- Camacho, B. H. (2009). *Estudio morfométrico-fractal de la bioestructura de Rhizopus oligosporus durante su crecimiento*. Tesis Doctoral, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas.
- Campillo Díaz-Plaza, N. (2009). *Utilización de datos de lluvia en estudios hidrológicos de inundación : aplicación con HEC-HMS*. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Retrieved from <http://ccuc.cbuc.cat/record=b4290148~S23%2Aspi>
- Campos-Aranda, D. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico* (3ª Edición). San Luis Potosí. <http://doi.org/ISBN9686194444>
- Campoverde, R., & Satián, D. P. (2015). *Generación de cartografía catastral rural a partir de datos LiDAR, cantón Otavalo*. ESPE, Quito. Retrieved from <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/12063>
- Canada, N. R. (2010). Fundamentals_E.Pdf. In *Fundamentals of Remote Sensing*.
- CARTOMEX. (2016). Lidar en la minería | Prospección minera con LIDAR | Topografía en minas. Retrieved September 18, 2017, from <https://www.cartomex.com/mineria-lidar.html>
- Castellet, E. B. I., Agregado, P., Flumen, I., Sánchez-truebos, I. H., Ripollés, J. D., Universidad, C. De, ... Dehesa, J. (2014). Modelo Hidrológico Distribuido Y Un Modelo Hidráulico, 117.
- Castillo, F. (2015). Delimitación automática de microcuencas utilizando datos SRTM de la NASA. *Enfoque UTE*, 6, 81–97. Retrieved from <http://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/index.php/revista/article/view/80>
- CELEC E.P. (2013). Estudios Proyecto Hidroelèctrico Zamora-Santiago. Retrieved September 18, 2017, from <https://www.celec.gob.ec/hidropaute/proyectos/31-espanol/proyectos/index.php>

- CEOS EO HANDBOOK. (n.d.). Retrieved December 31, 2016, from <http://www.eohandbook.com/>
- Chen, Z., Bingbo, G., & Devereux, B. (2017). State-of-the-Art: DTM Generation Using Airborne LIDAR Data, 24.
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing. An Environmental Approach*. (P. CRC, Ed.) (Second Edi). Boca Raton (USA): Editorial Ariel.
- CIMSS. (2004). Evolution of Satellite Meteorology, (July), 1–15.
- Coloma, L. A. P. (2015). Simulación Hidrológica e Hidráulica del Río Tambo, sector Santa Rosa, distrito de Cocachacra, provincia de Isla y, Departamento De Arequipa. Lima.
- Córdova, M. (2015). *Estimación de caudales medios naturalizados en la cuenca del río Mantaro mediante el método de regionalización estadística*. Pontificia Universidad Católica Del Perú.
- Crippen, R., Buckley, S., Agram, P., Belz, E., Gurrola, E., Hensley, S., ... Tung, W. (2016). Nasadem global elevation model: Methods and progress. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 41(July), 125–128. <http://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B4-125-2016>
- Cushing, M. (2008). Desarrollo de Mapas de Relieve . Hidrografía y Derivados para Suramérica Papel Concepto Introducción. *Earth, 2003*(Corporación Andina de Fomento (CAF) U.S. Geological Survey (USGS)).
- De Bartolo, S. G., Gabriele, S., & Gaudio, R. (2000). Multifractal behavior of river networks. *Hydrology and Earth System Sciences*.
- De Bartolo, S., Gaudio, R., & Gabriele, S. (2004). Multifractal analysis of river networks: Sandbox approach. *Water Resources Research*, 40, 1–10.
- De Gloria, S. D., Beaudette, D. E., Irons, J. R., Libohova, Z., O'Neill, P. E., Owens, P. R., ... Wysocki, D. A. (2014). Emergent imaging and geospatial technologies for soil investigations. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 80(4), 289–294.
- Dewberry. (2012). *National Enhanced Elevation Assessment*. Virginia - EEUU: USGS.
- Doffo, N., & Bonorino, G. (2005). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del arroyo Las Lajas, Córdoba: Un análisis estadístico. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 60, 60(1), 16–22.

- Duque Matínez, J. S. (2015). Comparación estadística de métodos interpolación determinísticos y estocásticos para la generación de modelos digitales del terreno a partir de datos LIDAR, en la parroquia de Tumbabiro, cantón San Miguel de Urququí, provincia de Imbabura. Retrieved from <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/3569>
- EL Mercurio. (2014, March 17). Presentan proyecto Puma en el Cañar | Diario El Mercurio - Cuenca Ecuador. Azogues. Retrieved from <http://www.elmercurio.com.ec/422592-presentan-proyecto-puma-en-el-canar/>
- El Tiempo. (2013, September 2). U. de Cuenca elabora proyecto Pacalori. Cuenca. Retrieved from <http://www.eltiempo.com.ec/noticias/cuenca/2/319373/u-de-cuenca-elabora-proyecto-pacalori>
- EO, P. D. (n.d.). SRTM - eoPortal Directory - Satellite Missions. Retrieved June 13, 2017, from <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/srtm>
- ESRI. (2016a). Cómo funciona Acumulación de flujo—Ayuda | ArcGIS for Desktop. Retrieved December 31, 2016, from <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-flow-accumulation-works.htm>
- ESRI. (2016b). Cómo funciona Dirección de flujo—Ayuda | ArcGIS for Desktop. Retrieved December 31, 2016, from <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-flow-direction-works.htm>
- ESRI. (2016c). Cómo funciona Rellenar—Ayuda | ArcGIS for Desktop. Retrieved December 31, 2016, from <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-fill-works.htm>
- Estornell, J. (2011). Análisis de los factores que influyen en la precisión de un MDE y estimación de parámetros forestales en zonas arbustivas de montaña mediante datos LiDAR. *Tesis Doctoral*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Fallis, A. . (2013). Geomorphic Setting, Aquatic Habitat, and Water-Quality Conditions of the Molalla River, Oregon. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Falorni, G., Teles, V., Vivoni, E. R., Bras, R. L., & Amaratunga, K. S. (2005). Analysis and characterization of the vertical accuracy of digital elevation models from the Shuttle Radar Topography Mission. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110(2), 1–20. <http://doi.org/10.1029/2003JF000113>

- Farr, T., Rosen, P., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., ... Alsdorf, D. (2005). The Shuttle Radar Topography Mission. *Eos Trans. AGU*, 82(2005), 47. <http://doi.org/10.1029/2005RG000183.1>.INTRODUCTION
- Fattorelli, S., & Fernández, P. C. (2011). Diseño Hidrológico, 531.
- Felicísimo, A. (1994). Modelos digitales del terreno: introducción y aplicaciones a las ciencias ambientales. *Oviedo: Universidad de Oviedo*, 118. Retrieved from <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli>
- Forkuor, G., & Maathuis, B. (2012). Comparison of SRTM and ASTER Derived Digital Elevation Models over Two Regions in Ghana – Implications for Hydrological and Environmental Modeling. *Studies on Environmental and Applied Geomorphology*. <http://doi.org/10.5772/1522>
- Fries, A., Rollenbeck, R., Nauss, T., Peters, T., & Bendix, J. (2012). Near surface air humidity in a megadiverse Andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152(1), 17–30. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.08.004>
- Fujii, T., & Fukuchi, T. (2013). *Laser Remote Sensing. Dynamical systems with applications using MATLAB* (Vol. 53). <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- GADM-Ibarra. (2016). Ibarra actualizará el Catastro Urbano. Retrieved September 18, 2017, from <https://www.ibarra.gob.ec/web/index.php/informativo/noticiasactualidad/2385-ibarra-actualizara-el-catastro-urbano>
- GADM-Machala. (2016). Actualización catastral de Machala inició proceso con tecnología LIDAR. Retrieved June 2, 2017, from <http://www.machala.gob.ec/noticias/2016/agosto/actualizacion-catastral-machala-inicio-proceso-tecnologia-lidar.php>
- GADM-Manta. (2017, February 7). Hacen estudio a fondo para conocer la situación predial de Manta – Revista de Manabí. Manta. Retrieved from <https://revistademanabi.com/2017/02/07/hacen-estudio-a-fondo-para-conocer-la-situacion-predial-de-manta/>
- GADP-Sabanilla. (2015). Plan De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial 2015 – 2019. *Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural “Sabanilla” Administración 2014-2019*.

- Galarza, M. (2014). *Control de calidad de datos LIDAR aerotransportado en la zona austral del Ecuador. Departamento de Posgrados. Tesis de Maestría, Universidad Del Azuay.* Retrieved from <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/4027/1/10626.pdf>
- Gambini, J. (2006). *Modelos de segmentación basados en regiones y contornos activos aplicados a imágenes de radar de apertura sintética.* Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires.
- García, A. M. (2012). Evaluación del uso de la tecnología LiDAR en la estimación del contenido de carbono forestal.
- García, V. J. L., & Ruiz, J. E. C. (2014). *El Sistema LiDAR aplicado a la geomática, generando Modelos Digitales de Elevación (MDE).* Tesis. Universidad Nacional Autónoma De Mexico.
- García Marín, A. P. (2007). *Análisis multifractal de series de datos pluviométricos en Andalucía.* Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba.
- Gil-Yepes, J. L., Ruiz, L. A., Fernández-Sarría, A., & Hermosilla, T. (2012). Detección y localización de árboles en áreas forestales empleando datos LiDAR y ortofotografías. *Mapping, N° 155.* Valencia, España: Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia.
- Gold, C. (2005). *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology.* CRC Press. <http://doi.org/10.1201/9780203357132>
- González, C. V. (2016). Imágenes ASTER, 11. Retrieved from <http://www.geosoluciones.cl/documentos/aster/IMAGENES-ASTER.pdf>
- González, F. E., Marcello, J., & Marqués, F. (2007). Tutorial de Teledetección Espacial. España: TELECAN. Retrieved from https://www.grss-ieee.org/wp-content/uploads/2014/07/ES_TUTORIAL_COMPLETO.pdf
- González, V. H., Bujan, S., González-Ferreiro, E., Barreiro-Fernandez, L., & Dieguez-Aranda, D. (2013). Estimación de volumen a partir de datos LiDAR para pino radiata en el Municipio de Guitiriz. *Revista GEOESPACIAL, 10,* 45–57. Retrieved from <http://geoespacial.espe.edu.ec/wp-content/uploads/2017/01/Geoespacial10.pdf>
- Gorokhov, V. G. (2009). Scientific investigation , technological development and economical governmental support : the historical development of RADAR science and technology I 1, 1347–1371.

- Grejner-Brzezinska, D. A., Toth, C. K., McCord, M. R., for Mapping, O. S. U. C., of Transportation, O. D., & Administration, U. S. F. H. (2005). *Airborne LiDAR: A New Source of Traffic Flow Data*. Ohio State University, Department of Civil & Environmental Engineering & Geodetic Science, Center for Mapping. Retrieved from <https://books.google.com.ec/books?id=kZ8qAQAAMAAJ>
- Gutiérrez, H. (2008). Estudio De Geometria Fractal En Roca Fracturada Y Series De Tiempo. *Universidad De Chile Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas Departamento De Ingenieria Civil*. Santiago de Chile.
- Guzmán, J. (2015). Georreferenciación de la red de conducción del acueducto del Municipio de Chaguani - Cundinamarca. Bogotá.
- Hacker, R. (2016). 3d Laser Scanning + Bim Modeling. *LiDAR Magazine*, 6(2). Retrieved from http://www.lidarmag.com/PDF/LIDARMagazine_Hacker-ScanningAndBIM_Vol6No2.pdf
- Heideman, H. K. (2014). LIDAR base specification (ver. 1.2). *U.S. Geological Survey Techniques and Methods 11-B4*. <http://doi.org/10.3133/tm11B4>
- Hernández, A. (2015). *Uso de la tecnología lidar para la evaluación de riesgos volcánicos*. México.
- Höhle, J., & Potuckova, M. (2011). Assessment of the Quality of Digital Terrain Models. *EuroSDR*, (60), 91.
- Homeier, J., Leuschner, C., Bräuning, A., Cumbicus, N. L., Hertel, D., Martinson, G. O., ... Veldkamp, E. (2013). Ecosystem Services, Biodiversity and Environmental Change in a Tropical Mountain Ecosystem of South Ecuador. *Ecological Studies*, 221, 1–16. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-38137-9>
- Horna, L. N. (2016). *Evaluación Hidrometeorológica y de Sedimentos en la Cuenca del Río Coca en la Zona de Influencia del Proyecto Coca Codo Sinclair*. Escuela Politécnica Nacional.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society Of America Bulletin*, 56(1), 151–180. [http://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56](http://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56)
- Hudak, A. T., Evans, J. S., & Smith, A. M. S. (2009). LiDAR utility for natural resource managers. *Remote Sensing*, 1(4), 934–951. <http://doi.org/10.3390/rs1040934>
- Ibañez Martínez, E. (2008). *Validación de modelos digitales del terreno de precisión a partir*

de datos láser escáner aerotransportado; aplicación a la marisma del parque nacional de Doñana. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.

IGM, (Instituto Geográfico Militar). (2009). Obtención de cartografía escala 1:5.000 y generación de cartografía básica oficial escala 1:25.000 a nivel nacional. (p. 47). Quito: IGM.

Iturriaga, R., & Jovanovich, C. (2014). Fractales, economía y empresas. Argentina.

Jardí, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*. <http://doi.org/10.1016/j.jag.2004.06.003>

Jarihani, A. A., Callow, J. N., McVicar, T. R., Niel, T. G. Van, & Larsen, J. R. (2015). Satellite-derived Digital Elevation Model (DEM) selection, preparation and correction for hydrodynamic modelling in large, low-gradient and data-sparse catchments. *Journal of Hydrology*, 524, 489–506. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.049>

JAXA. (2008). ALOS Data Users Handbook R e v i s i o n C. *Aerospace*, (March), 158. Retrieved from http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/fdata/ALOS_HB_RevC_EN.pdf

JAXA EORC; RESTEC, S. (2006). The ALOS PALSAR Global Systematic Acquisition Strategy : 4 Years in Operation, 4–6.

Jiang, J., Zhang, Z., & Ming, Y. (2008). Filtering of airborne lidar point clouds for complex cityscapes. *Geo-Spatial Information Science*, 11(1), 21–25. <http://doi.org/10.1007/s11806-007-0157-2>

Jianyu, W. (2013). 王建宇 舒 嵘 黄庚华 薛永祺, 67–76.

Jie, Y., Haiquan, Y., Ming, T., & Guoning, Z. (2006). Building extraction from LIDAR based semantic analysis. *Geo-Spatial Information Science*, 9(4), 281–284. <http://doi.org/10.1007/BF02826741>

JSPACESYSTEMS. (2011). Features of ASTER G-DEM. Retrieved September 18, 2017, from <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/2.html>

Kanevski, M., & Pereira, M. G. (2017). Local fractality: The case of forest fires in Portugal Mikhail. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 479, 400–410. <http://doi.org/10.1016/j.physa.2017.02.086>

Kraus, K., & Pfeifer, N. (1998). Advanced DTM Generation From Lidar Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*.

<http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Kumar, D. N. (2014). Remote sensing- Digital Elevation Model Introduction, sources of digital elevation data, types of DEM, 1–9.

Kumar, P., & Prakash, O. (2017). The role of Laser Scanning Technology Lidar Scanning and Building Information Modelling in Building Construction. *International Journal Of Engineering Sciences & Research Technology*, 6(3), 317–320. <http://doi.org/10.5281/zenodo.400955>

Labrador, M., Évora, J. A., & Arbelo, M. (2012). *Satélites de teledetección para la gestión del territorio*.

Landmap. (2016). Introduction - ALOS PALSAR | Palsar | Datasets. Retrieved September 18, 2017, from <http://learningzone.rspso.org.uk/index.php/Datasets/Palsar/Introduction-ALOS-PALSAR>

Lanig, S., & Zipf, A. (2009). Interoperable processing of digital elevation models in grid infrastructures. *Earth Science Informatics*. <http://doi.org/10.1007/s12145-009-0030-y>

Lee, I., Wu, B., & Li, R. (2009). Shoreline Extraction From the Integration of Lidar Point Cloud Data and Aerial Orthophotos Using Mean Shift Segmentation. In *ASPRS Annual Conference*.

Leoni, L., Spencer, G., Coli, N., Coppi, F., & Michelini, A. (2016). Techniques for three-dimensional displacement vector using ground-based interferometric synthetic aperture radar.

Li, J., & Wong, D. W. S. (2010). Effects of {DEM} sources on hydrologic applications. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34(3), 251–261. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2009.11.002>

Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. H. (1977). *Hidrología para Ingenieros* (2º Edición). México: McGraw-Hill.

Liu, C., Sun, W., & Wu, H. (2010). Determination of complexity factor and its relationship with accuracy of representation for DEM terrain. *Geo-Spatial Information Science*, 13(4), 249–256. <http://doi.org/10.1007/s11806-010-0390-y>

Liu, H. (2010). Introduction to LiDAR Remote Sensing. *Ohio URISA LiDAR Workshop*, 1–23.

Liu, X., & Zhang, Z. (2008). LiDAR data reduction for efficient and high quality DEM generation.

International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.

- Loaiza, C. (2017). *Análisis de la eficacia y del comportamiento de los errores en posición presentes en la generación de modelos digitales de elevación con software fotogramétrico libre y comercial, para una zona de la ciudad de Bogotá D.C.* Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- López, R., & Betrouni, N. (2009). Fractal and multifractal analysis: A review of medical Image Analysis. *Medical Image Analysis*. <http://doi.org/10.1016/j.media.2009.05.003>
- López Sanchez, D. (2010). Software para la gestión de un proyecto de datos LiDAR en un sistema de información geográfica. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Malachowski, M. J., & Zmija, J. (2010). Organic field-effect transistors. *Opto-Electronics Review*, 18(2), 121–136. <http://doi.org/10.2478/s11772>
- Mandelbrot, B. (1983). The Fractal Geometry of Nature. *American Journal of Physics*. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Mandelbrot, B. (1997). La geometría fractal de la naturaleza.
- Mandelbrot, B., & Hudson, R. (2006). Fractales y finanzas.
- Márquez, E. G., Bussmann, R., Tapia, A., Fierro, M., Melorose, J., Perroy, R., & Careas, S. (2003). Los Bosques Montañosos de la Reserva Biológica San Francisco (Zamora-Chinchipe, Ecuador) - zonación de la vegetación y Regeneración naturales. *Lyonia*, 3(1), 57–72. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Martin-García, S., Diéguez-Aranda, U., Álvarez, J., Perez Cruzado, C., Buján, S., & González-Ferreiro, E. (2017). Estimación de las existencias maderables de *Pinus radiata* a escala provincial utilizando datos LiDAR de baja resolución. *Bosque* , 38, 17–28. <http://doi.org/10.4067/S0717-92002017000100003>
- Martínez-Martínez, S. I., & Campos-Aranda, D. F. (2010). Algoritmos para estimar características físicas en cuencas rurales y su aplicación en el calibrado del método racional, en la región hidrológica no. 12 parcial (Río Santiago). *Agrociencia*, 44(4), 393–408.
- Martínez, P. (2007). Metodología para el estudio de avenidas en Ramblas de cuencas mediterráneas utilizando sistemas de información geográfica y modelos semidistribuidos.

- Martínez Blanco, M. (2016). Evaluación y propuesta de metodologías de clasificación a partir del procesado combinado de datos LiDAR e imágenes aéreas georreferenciadas. Retrieved from <http://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/8339/TesisMPMB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Maune, D. F. (2010). Digital Elevation Model (DEM) Whitepaper NRCS High Resolution Elevation Data, 120.
- McGaughey, R. (2015). FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization.
- Mercado, J., Iñiguez, M., Aldama, A., & Mejía, M. (2005). Modelo Multifractal Aplicado Al Riego. *Revista de Matemática: Teoría Y Aplicaciones*, 12, 173–186.
- Meseguer-Ruiz, Ó., Martín-Vide, J., Olcina Cantos, J., & Sarricolea, P. (2017). Análisis y comportamiento espacial de la fractalidad temporal de la precipitación en la España peninsular y Baleares (1997-2010). *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, (73). <http://doi.org/10.21138/bage.2407>
- Miranda, V., Chomiczak, S., & Paz, A. (1999). Fractal theory and scale change effect: application for studying soil porosity. Coruña: Universidad de la Coruña.
- Mitchell, E. A. L., Tapley, I., Milne, A. K., Lowell, K., Mitchell, C. A. L., Tapley, I., ... Held, A. (2012). Tasmania National Demonstrator Rdar processing methodologies for the generation of wall-to-wall mosaics Prepared by IFCI Research Alliance wall-to-wall mosaics, 1.
- Molina Simbaña, P. X. (2016). Geografía del carbono en alta resolución en bosque tropical amazónico del ecuador mediante sensores aerotransportados. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- Monsalve, S. G. (1999). *Hidrología En La Ingeniería* (Segunda Ed). Colombia.
- Montealegre, A. L., Lamelas, M. T., & De la Riva, J. (2013). Evaluación de métodos de filtrado para la clasificación de la nube de puntos del vuelo LiDAR PNOA. *XV Congreso de La Asociación Española de Teledetección INTA, Torrejón de Ardoz (Madrid)*.
- Montero, E. (2003). Aplicación de técnicas de análisis multifractal a distribuciones de tamaño-volumen de partículas de suelo obtenidas mediante análisis por difracción de láser. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Tesis Doctoral.
- Moreno Brotóns, J., Alonso Sarría, F., Gomariz Castillo, F., & Alonso Bernardo, D. (2010). Análisis y validación de modelos digitales de elevaciones mediante datos LIDAR.

- Tecnologías de La Información Geográfica: La Información Geográfica Al Servicio de Los Ciudadanos. Secretariado de Publicaciones de La Universidad de Sevilla. Sevilla, Tecnología(2010), 254–271.*
- Mosquera, B. (2017). Cartografía de actividades extrativas a partir de datos LiDAR-TFM. Trabajo fin de Máster, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Mukherjee, S., Joshi, P. K., Mukherjee, S., Ghosh, A., Garg, R. D., & Mukhopadhyay, A. (2012). Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. <http://doi.org/10.1016/j.jag.2012.09.004>
- Muñoz, A., Solís, E., & Zamora, J. (2016). Análisis morfológico del espectro multifractal para la detección temprana de patologías cardíacas. México.
- Naciones Unidas. (2002). *Tratados Y Principios de Las Naciones Unidas Sobre El Espacio Ultraterrestre*.
- Nápoles, J. E., & Palomá, L. (2012). Fractals around us. VIDYA.
- NASA. (2015). NASA Applied Remote Sensing Training.
- Neiza, N. (2011). Metodología para la realización de la corrección topográfica en los estudios gravimétricos , utilizando datos de radar y el Modelo digital de Elevación - DEM -, 142.
- Nisperuza Toledo, D. J. (2010). Diseño y construcción de un sistema óptico de monitoreo atmosférico aplicado a la determinación de la capa límite atmosférica en la ciudad de Medellín, 94. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/1936/>
- Olaya, V. (2014). Sistemas de Información Geográfica. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Oñate-Valdivieso, F. (2009). Modelamiento semidistribuido, con información escasa, de una cuenca hidrográfica para su planificación territorial, 91–120.
- Papasaika-Hanusch, C. (2012). *Fusion of Digital Elevation Models*.
- Parra Artero, F. J. (2013). *Evaluación de diferentes algoritmos de filtrado de datos LiDAR para la clasificación Automática de suelo desnudo y microrrelieve. (Edificios, invernaderos y vegetación)*. Tesis de Máster, Universidades de Córdoba y de Málaga.
- Paul, D., Mandla, R., & Singh, T. (2015). Quantifying and modeling of stream network using digital elevation models. Bangalore: Ain Shams Engineering.

- Pavón-Domínguez, P., Ariza-Villaverde, A. B., Rincón-Casado, A., Gutiérrez de Ravé, E., & Jiménez-Hornero, F. J. (2017). Fractal and multifractal characterization of the scaling geometry of an urban bus-transport network. *Computers, Environment and Urban Systems*. <http://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.03.003>
- Pavón Rodríguez, P. (2012). *Multifractal study about the influence of meteorological and chemical factors on ground-level ozone concentration*. Doctoral thesis, Universidad de Córdoba.
- Pérez, L. (2016). MundoCartoGeo: Modelos Digitales ASTER, Descripción, evolución y utilidad. Retrieved September 18, 2017, from <http://mundocartogeo.blogspot.com/2015/12/modelos-digitales-aster-descripcion.html>
- Pérez, R. (2003). *Sobre la teoría del Caos aplicada en sismotectónica: Geometría fractal de fallas y terremotos*. Universidad Complutense de Madrid.
- Pike, R. J., Evans, I. S., & Hengl, T. (2009). Geomorphometry: a brief guide. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*, 33(1944), 3–30. [http://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00001-9](http://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00001-9).
- Pirateque, J. (2013). *Uso de la Metodología Wavelets Para la Validación de la Regla de La Raíz del Tiempo y su Aplicación al Riesgo de Mercado*. Universidad Nacional de Colombia.
- Planet Labs. (2015). Planet Labs Specifications: Satellite Imagery Products, (July), 1–17.
- Portilla Farfán, F. (2012). *Significado empírico de la multifractalidad de la precipitación*. Universidad Politécnica de Madrid.
- PROMAS. (2014). Tecnología LIDAR al servicio del Proyecto PACALORI. Retrieved September 18, 2017, from <http://promas.ucuenca.edu.ec/Promas/index.php/tecnologia-lidar-al-servicio-del-proyecto-pacalori.html>
- Purinton, B., & Bookhagen, B. (2017). Validation of digital elevation models (DEMs) and comparison of geomorphic metrics on the southern Central Andean Plateau. *Earth Surface Dynamics*, 5(2), 211–237. <http://doi.org/10.5194/esurf-5-211-2017>
- Rais, S., & Javed, A. (2014). Drainage characteristics of Manchi basin , Karauli district , Eastern Rajasthan using remote sensing and GIS techniques, 5(1), 104–118.
- Ravibabu, M., Jain, K., Singh, S., & Meeniga, N. (2010). Accuracy improvement of ASTER stereo satellite generated DEM using texture filter. *Geo-Spatial Information Science*,

13(4), 257–262. <http://doi.org/10.1007/s11806-010-0376-9>

Rexer, M., & Hirt, C. (2014). Comparison of free high resolution digital elevation data sets (ASTER GDEM2, SRTM v2.1/v4.1) and validation against accurate heights from the Australian National Gravity Database. *Australian Journal of Earth Sciences*, 61(2), 213–226. <http://doi.org/10.1080/08120099.2014.884983>

Rivera, M. (1996). *Aplicación de geometría de fractales a la descripción de microestructuras Metálicas*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Roa Lobo, J., & Kamp, U. (2008). Modelos de Elevación Digital (MED) a partir de sistemas satelitales. Una introducción y análisis comparativo en la cordillera de Mérida-Venezuela. *Revista Geografica Venezolana*, 49(1), 11–42.

Rodriguez, E., Morris, C., & Belz, J. (2006). An assessment of the SRTM topographic products. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(3), 249–260. [http://doi.org/0099-1112/06/7203-0249/\\$3.00/0](http://doi.org/0099-1112/06/7203-0249/$3.00/0)

Rosas, L. (2009). Manual de procedimientos de delimitación y codificación de unidades hidrográficas caso Ecuador. Retrieved from http://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/07/Manual_de_procedimientos.pdf

Rosenqvist, A., Shimada, M., & Watanabe, M. (2004). ALOS PALSAR: Technical outline and mission concepts. *International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications*, 1(7), 1–7.

Ruíz, P., Garro, J. F., & Soto, G. J. (2014). El uso de imágenes lidar en Costa Rica: Casos de estudio aplicados en geología, ingeniería, y arqueología. *Revista Geológica de América Central*. <http://doi.org/10.15517/rgac.v51i1.16849>

Ruíz, R., & Torres, H. (2008). Manual De Procedimientos De Delimitación Y Codificación De Unidades Hidrográficas. *Uicn Sur*, 4–15.

Sadeq, H. (2012). Comparing Ground Survey Data with SRTM Satellite Data: Case Study in North of Iraq. *Al-Rafidain Engineering Journal, Mosul, Iraq*, 20(5), 136–147. Retrieved from <http://www.alrafidain.engineering-coll-mosul.com/files/2012/no5/E/FE-12-5-2012.pdf>

Sala, H., Matko, C., & Falk, U. (2014). Análisis y Comparación de dos Modelos Digitales de Elevación en La Isla 25 De Mayo (King George Island), Islas Shetland Del Sur , Antártida 25 De Mayo Island (King George Island), Shetland Del Sur Islands , Antarctica.

GEOACTA 39(2), 39(2), 14–29.

- Salamanca, J., & Pérez. (2008). LiDAR, una tecnología de última generación, para planeación y desarrollo urbano. *Revista Científica Y Tecnológica de La Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.*, 13(1), 67–76.
- Salamanca Céspedes, J. (2013). *Sistemas LIDAR, aplicaciones en SIG: tecnología LIDAR, propuesta para su aplicación en Sistemas de Información Geográfica, SIG*. Saarbrücken: Editorial Académica Española.
- Santos Berbel, C. de, Iglesias Martínez, L., Castro Malpica, M., Paréns-González, M., Anta Viguera, J. A., & Rama Huecas, E. (2014). Estudio de visibilidad en carreteras usando modelos digitales de elevación de alta resolución. *Ponencias de La Conferencia Esri España 2014 | Conferencia Esri España 2014 | 22/10/2014 - 23/10/2014 | Madrid, España*.
- Sanzana, P., Gironás, J., Braud, I., Branger, F., Rodríguez, F., Vargas, X., ... Jankowsky, S. (2017). A GIS-based urban and peri-urban landscape representation toolbox for hydrological distributed modeling. *Environmental Modelling and Software*. <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.022>
- Sarria, F. A. (2006). *Sistemas de Información Geográfica. Universidad de Murcia*, 239.
- Schenk, T. (2005). Introduction to Photogrammetry. *Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University*, 79–95. Retrieved from http://gscphoto.ceegs.ohio-state.edu/courses/GeodSci410/docs/GS410_02.pdf
- Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Bulletin of the Geological Society of America*, 67(5), 597–646. [http://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](http://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)
- Segeer, C., & Villodas, R. (2006). *Hidrología I. Universidad Nacional de Cuyo, Argentina*. Mendoza-Argentina.
- Sellers, C., Corbelle, E., Buján, S., & Miranda, D. (2015). Morfología interpretativa de alta resolución con datos LiDAR en la cuenca del Río Paute - Ecuador. *Revista de La Universidad Del Azuay*, 237–256.
- SENAGUA. (2014). En Cuenca: Se aplicará Tecnología LIDAR para Proyecto PUMA – Secretaría del Agua. Retrieved September 18, 2017, from <http://www.agua.gob.ec/en-cuenca-se-aplicara-tecnologia-lidar-para-proyecto-puma/>

- Sesnie, S. E., Mueller, J. M., Lehnen, S. E., Rowin, S. M., Reidy, J. L., & Thompson, F. R. (2016). Airborne laser altimetry and multispectral imagery for modeling Golden-cheeked Warbler (*Setophaga chrysoparia*) density. *Ecosphere*, 7(3), 1–19. <http://doi.org/10.1002/ecs2.1220>
- Sharma, M., Paige, G. B., & Miller, S. N. (2010). DEM development from ground-based LiDAR data: A method to remove non-surface objects. *Remote Sensing*, 2(11), 2629–2642. <http://doi.org/10.3390/rs2112629>
- Shean, D. E., Alexandrov, O., Moratto, Z. M., Smith, B. E., Joughin, I. R., Porter, C., & Morin, P. (2016). An automated, open-source pipeline for mass production of digital elevation models (DEMs) from very-high-resolution commercial stereo satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. <http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.012>
- Sierra, G. (2007). Procesos Hurst y Movimiento Browniano Fraccional en Mercados Fractales. CDMX: Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey.
- Silva, B., Álava-Núñez, P., Strobl, S., Beck, E., & Bendix, J. (2017). Area-wide evapotranspiration monitoring at the crown level of a tropical mountain rain forest. *Remote Sensing of Environment*, 194, 219–229. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.023>
- Silvetti, A., & Delrieux, C. (2010). Analisis Multifractal Aplicado a Imagenes Medicas.
- Simon. (2015). Digital Geography. Retrieved September 18, 2017, from <http://www.digital-geography.com/srtm-1-1-arc-second-now-available-large-global-coverage/#.WGiDMVXhDIU>
- Soni, S. (2016). Assessment of morphometric characteristics of Chakrar watershed in Madhya Pradesh India using geospatial technique. *Applied Water Science*. <http://doi.org/10.1007/s13201-016-0395-2>
- Spazio, S. (2016). Esa's Earth Observation Third Party Missions - Data Access Guide– May 2016. *European Space Agency*, 1.1(May), 5–25. Retrieved from https://earth.esa.int/c/document_library/get_file?folderId=13019&name=DLFE-744.pdf
- Spring, K. (2011). Encyclopedia of Optical Engineering. *Encyclopedia of Optical Engineering*, (April 2013), 37–41. <http://doi.org/10.1081/E-EOE>
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913–920. <http://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>

- Strijhak, S., Redondo, J., & Tellez, J. (2017). Multifractal analysis of a wake for a single wind turbine. *Topical Problems of Fluids Mechanics*, 275–284. <http://doi.org/https://doi.org/10.14311/TPFM.2017.035> MULTIFRACTAL
- Su, J., & Bork, E. (2006). Influence of Vegetation, Slope, and LiDAR Sampling Angle on DEM Accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2–10.
- Suárez, D. (2016). *Análisis de la utilización de la dimensión fractal y multifractal para la clasificación del uso y la cobertura del suelo en una imagen de radar de apertura sintética SAR, en una zona urbana*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Suzuki, S. (2014). Advanced Land Observing Satellite-2 (ALOS-2) DAICHI-2. Retrieved from http://global.jaxa.jp/projects/sat/alos2/pdf/daichi2_e.pdf
- Tachikawa, T., Hato, M., Kaku, M., & Iwasaki, A. (2011). Characteristics of ASTER GDEM version 2. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, (90 m), 3657–3660. <http://doi.org/10.1109/IGARSS.2011.6050017>
- Tachikawa, T., Kaku, M., Iwasaki, A., Gesch, D., Oimoen, M., Zhang, Z., ... Carabajal, C. (2011). ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. *NASA Land Processes Distributed Active Archive Center*, 27. Retrieved from https://lpdaacaster.cr.usgs.gov/GDEM/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf
- Tél, T., Fülöp, Á., & Vicsek, T. (1989). Determination of fractal dimensions for geometrical multifractals. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 159(2), 155–166. [http://doi.org/10.1016/0378-4371\(89\)90563-3](http://doi.org/10.1016/0378-4371(89)90563-3)
- Tobergte, D. R., & Curtis, S. (2013a). Advanced DTM generation from LiDAR data. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Tobergte, D. R., & Curtis, S. (2013b). *Laser Scanning for the Environmental Sciences. Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Torre Tojal, L. (2016). *Diseño y contraste de nuevos modelos de estimación del potencial energético de biomasa forestal en el Territorio de Bizkaia mediante técnicas de análisis estadístico espacial usando herramientas GIS con datos LIDAR*. Universidad de Cantabria.
- Ullrich, A., Studnicka, N., Hollaus, M., Briese, C., Wolfgang, W., Doneus, M., & Mücke, W.

- (2007). Improvements in DTM generation by using full-waveform airborne laser scanning data. *7th International Conference on "Laser Scanning and Digital Aerial Photography. Today and Tomorrow."* Retrieved from <https://www.ipf.tuwien.ac.at/cb/publications/2007/DTMimporvementFWFALS.pdf>
- UPC, (Universidad Politécnica de Cataluña). (2010). Apuntes de Fotogrametría y Teledetección. Barcelona, España.
- Urai, M., Tachikawa, T., & Fujisada, H. (2012). Data Acquisition Strategies for Aster Global DEM Generation. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 1-4*(September), 199–202. <http://doi.org/10.5194/isprsannals-1-4-199-2012>
- Van der Sande, C., Soudarissanane, S., & Khoshelham, K. (2010). Assessment of relative accuracy of AHN-2 laser scanning data using planar features. *Sensors, 10*(9), 8198–8214. <http://doi.org/10.3390/s100908198>
- Vera, M. W. (2003). Fractales. *Segundo Congreso Internacional de Matemáticas En La Ingeniería Y La Arquitectura*. Universidad de Buenos Aires.
- Vicsek, T. (1990). Mass multifractals. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. [http://doi.org/10.1016/0378-4371\(90\)90401-D](http://doi.org/10.1016/0378-4371(90)90401-D)
- Villón, M. (2002). *Hidrología*. (E. Villón, Ed.) (2º Edición). Lima-Perú.
- Wandinger, U. (2012). Introduction to Lidar. *Leibniz Institute for Tropospheric Research, 15*(1), 1–18. Retrieved from <http://www.forestry.gov.uk/forestry/inf-d-6rvc9j>
- Wang, C. K., & Tseng, Y. H. (2010). DEM Generation From Airborne LIDAR Data By an Adaptive Dual- Directional Slope Filter. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- Wojtowicz, M., Wojtowics, A., & Piekarczyk, J. (2015). Application of remote sensing methods in Agriculture. *Communication in Biometry and Crop Science, 11*(1), 31–50.
- Wu, S., Li, J., & Huang, G. H. (2008). A study on DEM-derived primary topographic attributes for hydrologic applications: Sensitivity to elevation data resolution. *Applied Geography, 28*(3), 210–223. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.02.006>
- Wulder, M. A., White, J. C., Nelson, R. F., Næsset, E., Irka, H. O., Coops, N. C., ... Gobakken, T. (2012). Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote Sensing of Environment, 121*, 196–209. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.001>

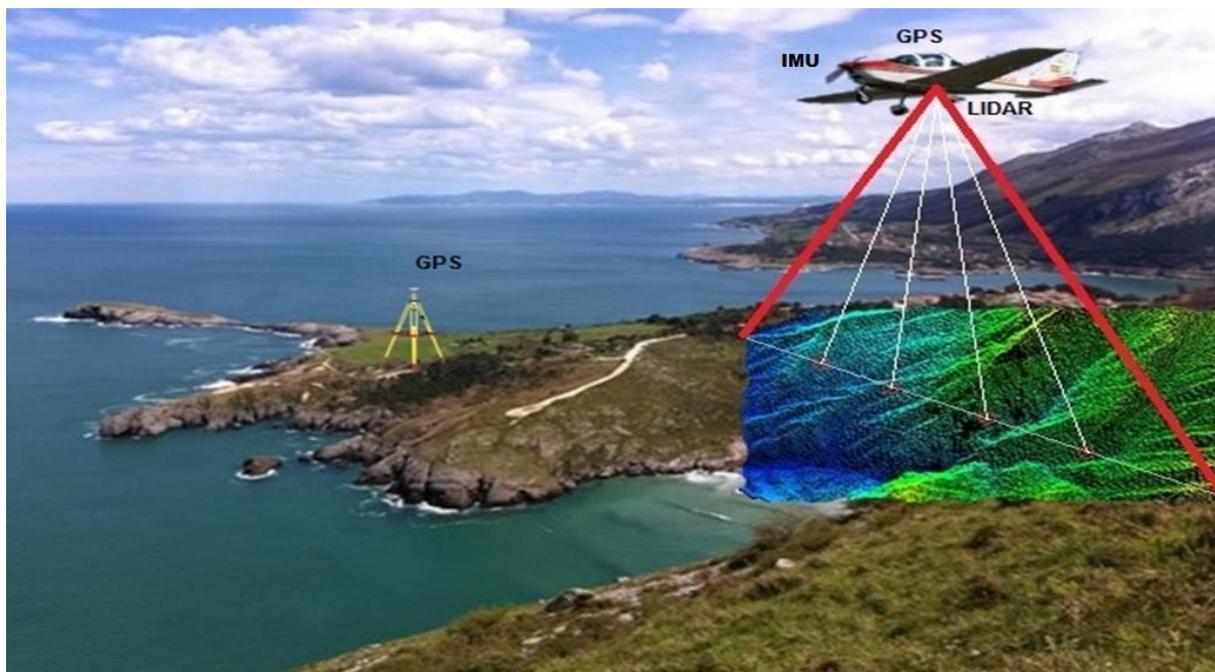
- Yamazaki, D., Ikeshima, D., Tawatari, R., Yamaguchi, T., O'Loughlin, F., Neal, J. C., ... Bates, P. D. (2017). A high-accuracy map of global terrain elevations. *Japón: Geophysical Research Letters*. <http://doi.org/10.1002/2017GL072874>
- Yue, L., Shen, H., Zhang, L., Zheng, X., Zhang, F., & Yuan, Q. (2017). High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 123, 20–34. <http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.11.002>
- Zeke, T., & Cheng, B. (2005). Scaling Relationships between Saturated Hydraulic Conductivity and Soil Physical Properties. *Soil Science Society of America Journal*. <http://doi.org/10.2136/sssaj2005.0072>
- Zhao, G., Gao, J., Tian, P., & Tian, K. (2009). Comparison of two different methods for determining flow direction in catchment hydrological modeling. *Water Science and Engineering*, 2(4), 1–15. <http://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2009.04.001>

ANEXOS

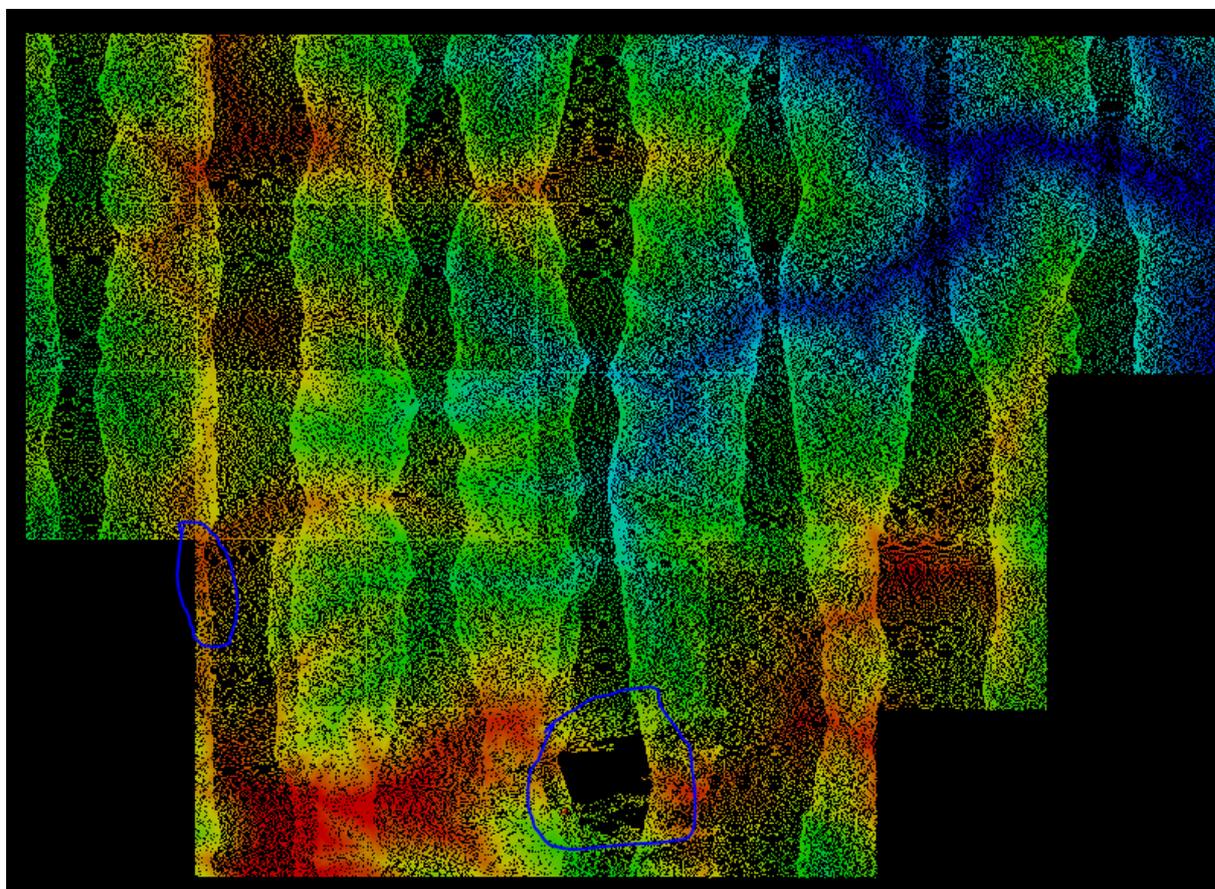
ANEXO 1: ÁREA DE ESTUDIO & VISTA 3D.



ANEXO 2: COMPONENTES DEL SISTEMA LIDAR.



ANEXO 3: DATOS LIDAR PARA LA ZONA DE ESTUDIO (Zonas marcadas = sin datos).

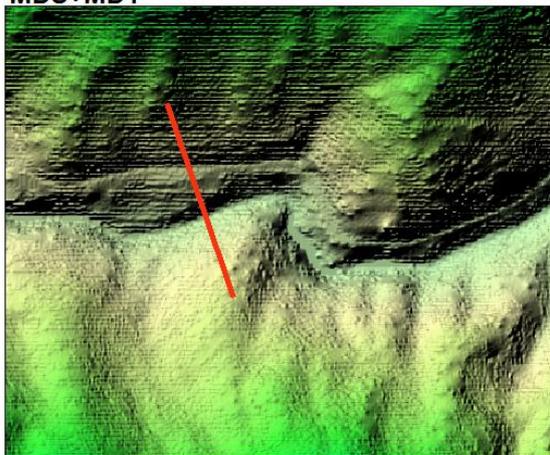


ANEXO 4: CORTE T. DE LOS MDE A PARTIR DE DATOS LIDAR Y SU COMPARACIÓN:

IMAGEN SATELITAL



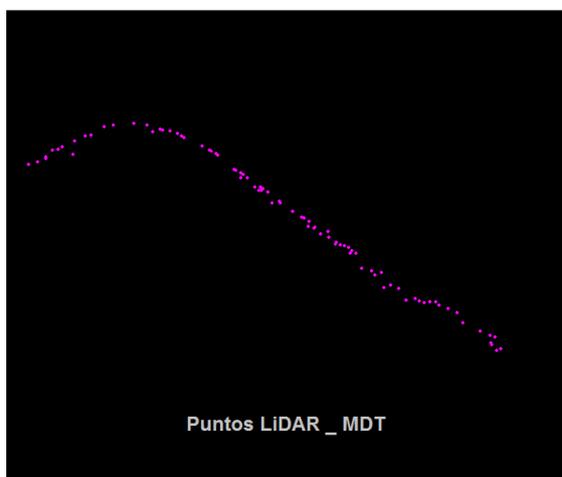
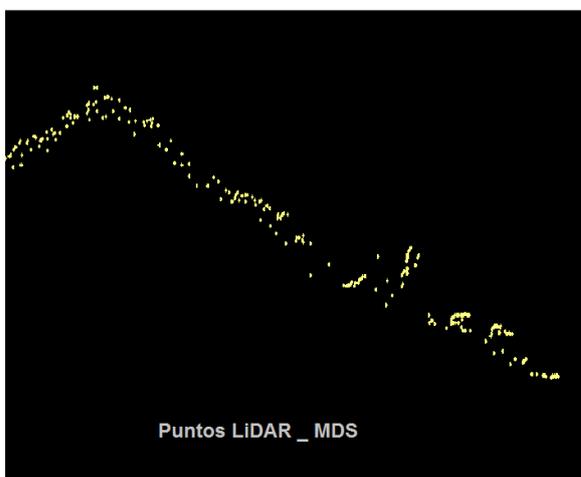
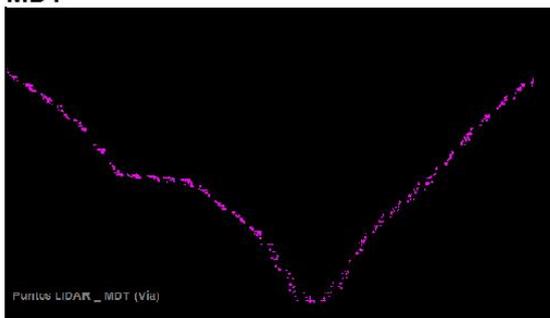
MDS+MDT



MDS

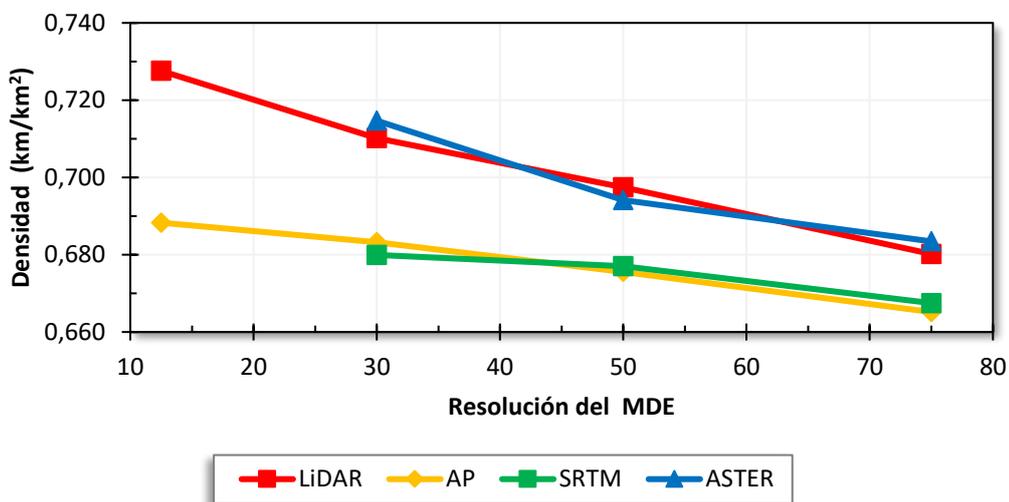


MDT

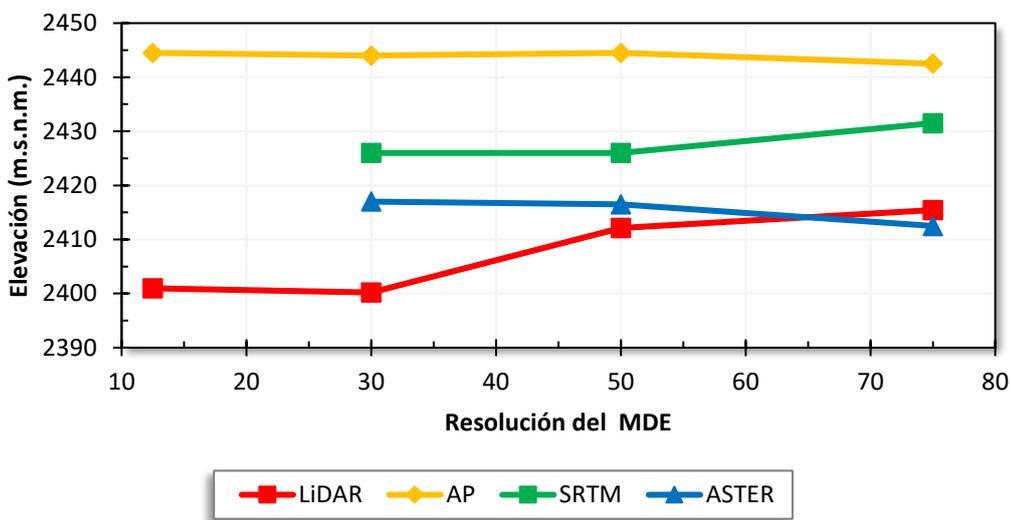


ANEXO 5: PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS:

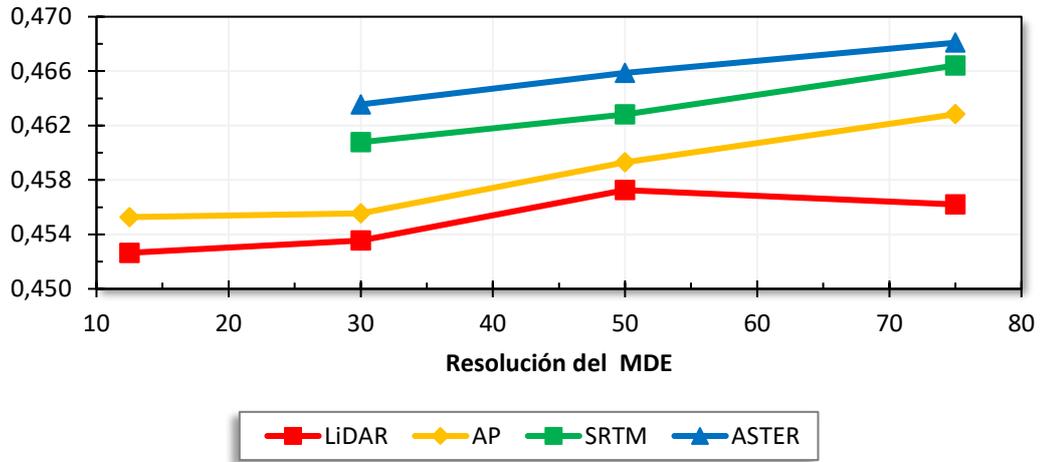
DENSIDAD DE DRENAJE (D_d)



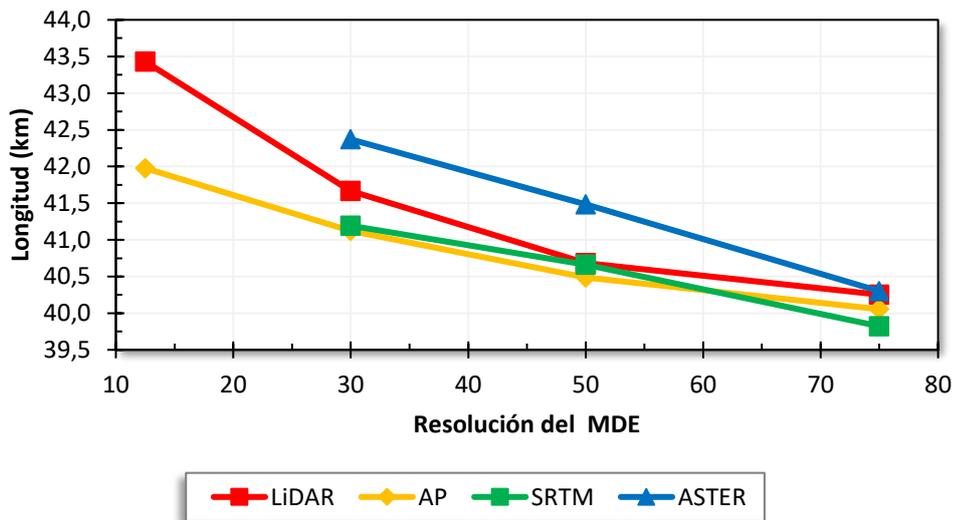
ELEVACIÓN MEDIA DE LA CUENCA (E)



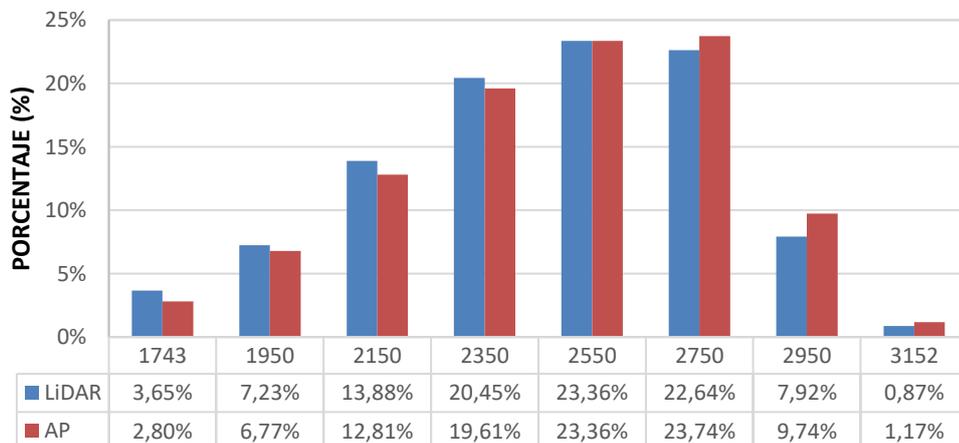
FACTOR FORMA (K_f)



PERÍMETRO (P)

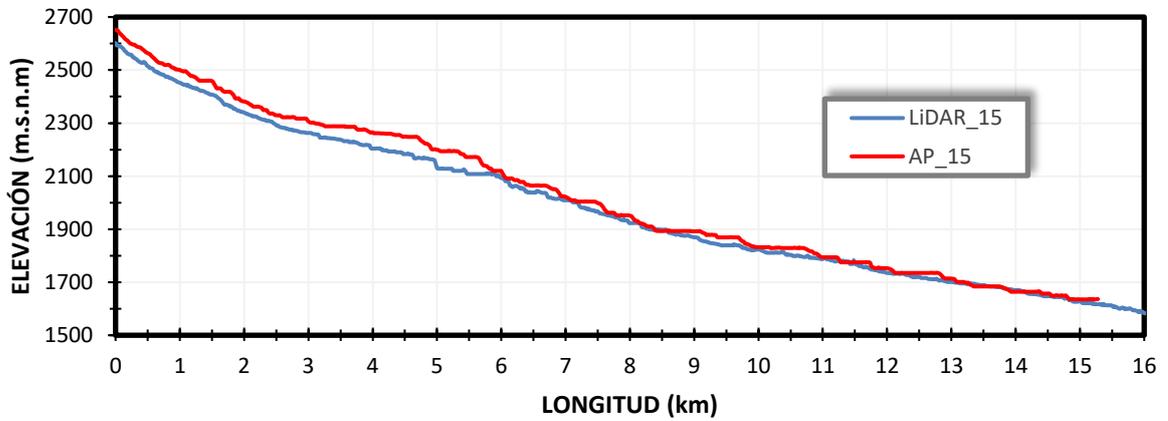


FRECUENCIA DE ALTITUDES (12.5 m.)

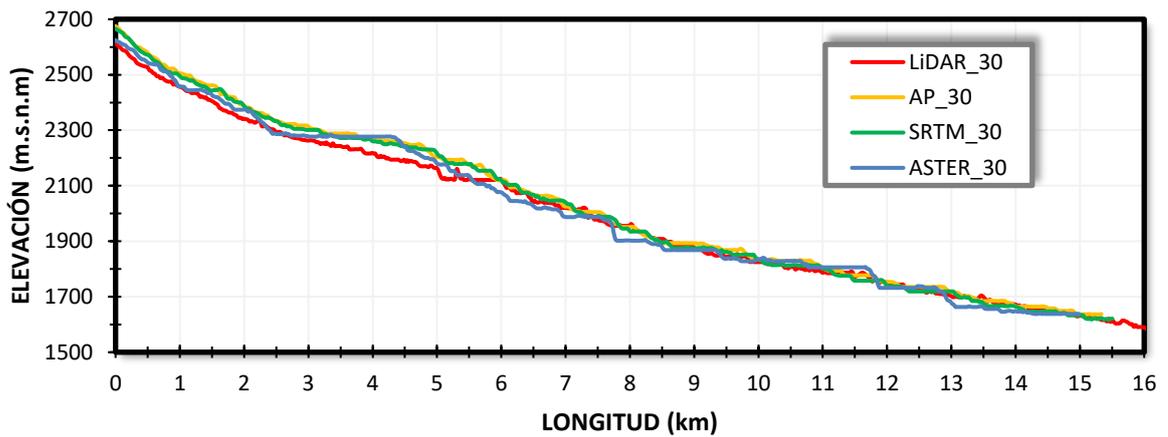


ANEXO 6: PERFIL LONGITUDINAL DEL CAUCE PRINCIPAL.

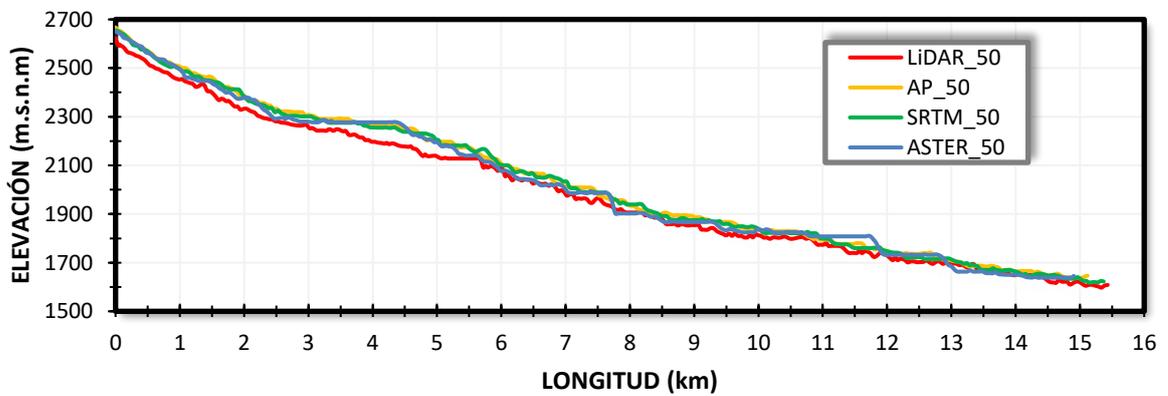
PERFIL LONGITUDINAL DEL RIO (Res. 12.5 m)



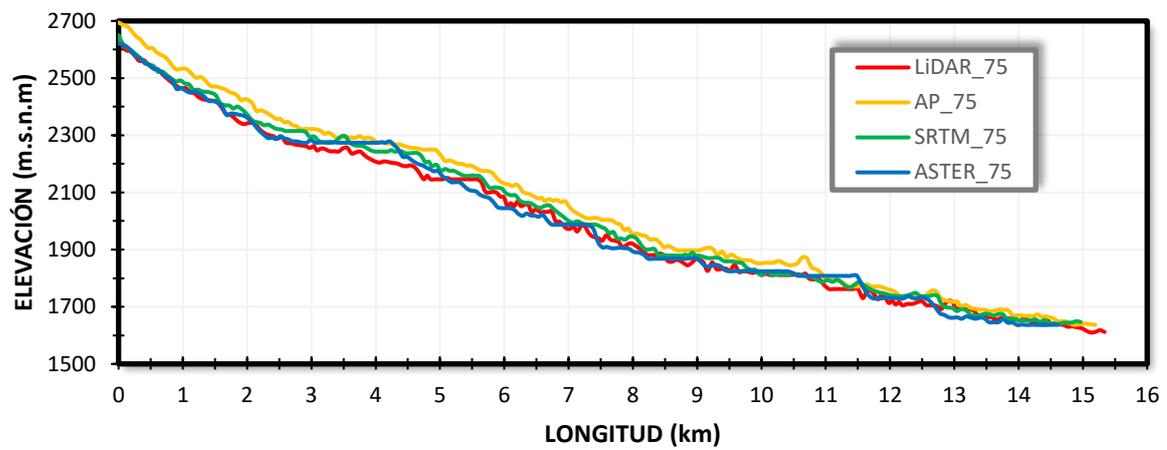
PERFIL LONGITUDINAL DEL RIO (Res. 30 m)



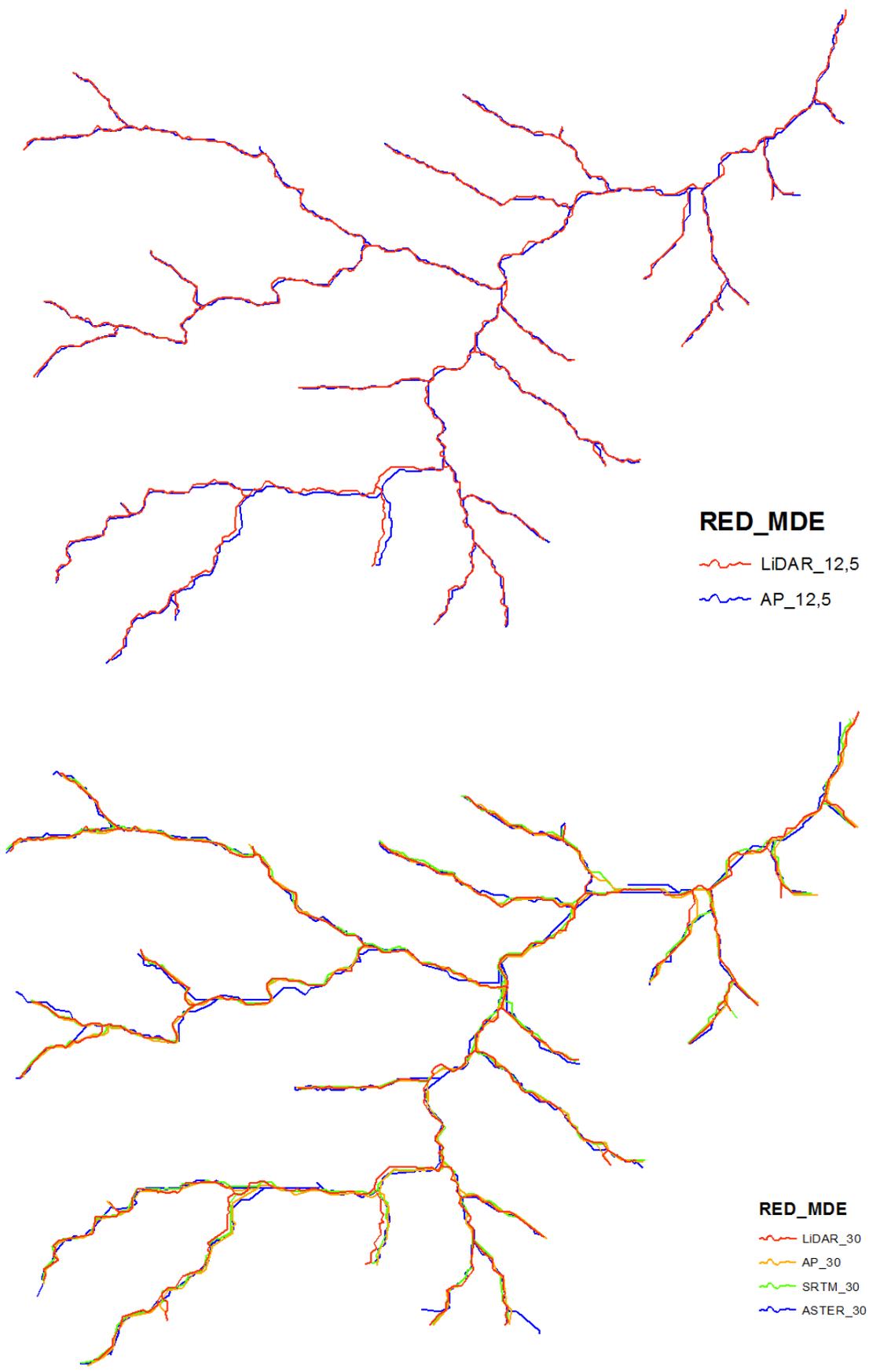
PERFIL LONGITUDINAL DEL RIO (Res. 50 m)

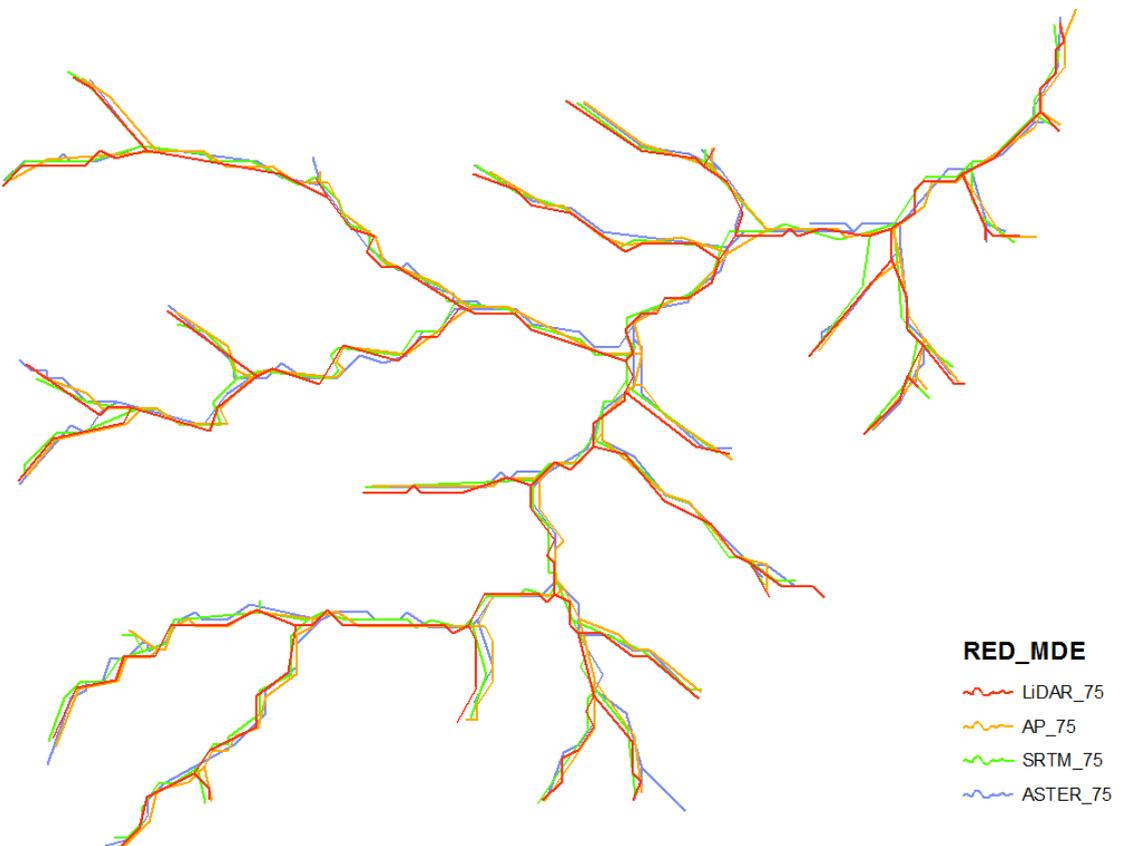
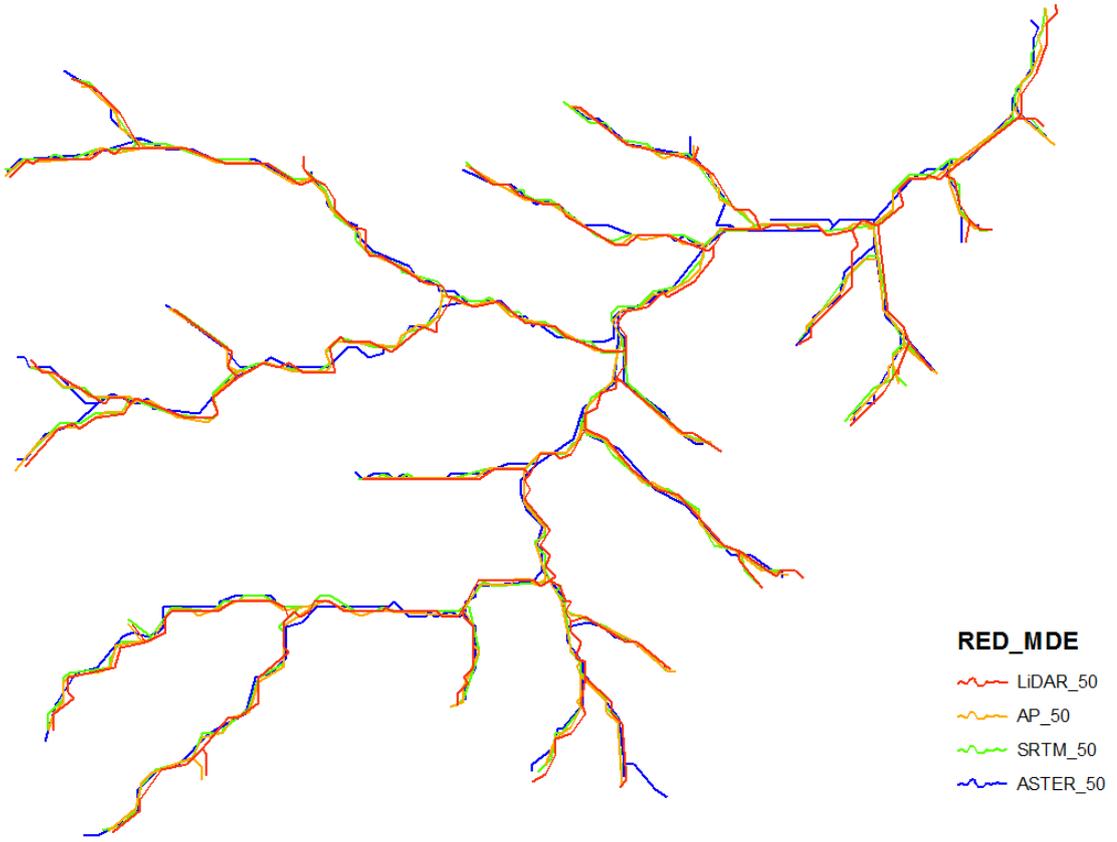


PERFIL LONGITUDINAL DEL RIO (Res. 75 m)



ANEXO 7: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS REDES GENERADAS:





ANEXO 8: RESUMEN DE LOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO SAN FRANCISCO:

PARÁMETROS MORFOMETRICOS	UNIDAD	NOMENCLATURA	5			12.5			30 x 30			50 x 50			75 x 75							
			LIDAR	LIDAR	AP	LIDAR	LIDAR	AP	SRTM	ASTER	LIDAR	LIDAR	AP	SRTM	ASTER	LIDAR	LIDAR	AP	SRTM	ASTER		
CENTRO DE LA CUENCA	m	X	710994,08	710992,14	710987,48	710979,33	710987,11	710975,99	710975,51	710979,33	710987,48	710979,33	710987,11	710975,99	710975,51	710979,33	710987,48	710975,99	710975,51	710996,10	710981,60	710959,65
	m	Y	9558901,76	955885,67	955885,57	9558890,72	9558884,89	9558899,80	9558915,63	9558890,72	955885,57	9558890,72	9558884,89	9558899,80	9558915,63	9558890,72	955885,57	9558890,72	9558900,50	9558885,60	9558890,65	9558898,56
Área de la cuenca:	Km ²	A	83,90	84,01	84,14	84,04	84,12	84,17	84,35	84,04	84,12	84,17	84,12	84,17	84,20	84,04	84,12	84,17	84,20	84,16	84,11	84,07
Perímetro de la cuenca:	Km	P	45,57	43,43	41,98	41,67	41,12	41,19	42,37	41,67	41,12	41,19	41,12	41,19	42,37	41,67	41,12	41,19	42,37	40,25	39,82	40,30
Longitud axial de la cuenca:	km	L	13,58	13,62	13,59	13,61	13,59	13,52	13,49	13,61	13,59	13,52	13,59	13,52	13,49	13,61	13,59	13,52	13,49	13,58	13,48	13,40
Ancho de cuenca:	1	$a = A / L$	6,18	6,17	6,19	6,17	6,19	6,23	6,25	6,17	6,19	6,23	6,19	6,23	6,25	6,17	6,19	6,23	6,25	6,20	6,24	6,27
Factor forma:	1	$K_f = A / L^2$	0,45	0,45	0,46	0,45	0,46	0,46	0,46	0,45	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,45	0,46	0,46	0,46	0,46	0,47	0,47
Coefficiente de Compacidad:	1	$K_c = 0,28 P / (A)^{0,5}$	1,39	1,33	1,28	1,27	1,26	1,26	1,29	1,27	1,26	1,26	1,26	1,26	1,29	1,27	1,26	1,26	1,27	1,23	1,22	1,23
Relación de elongación:	1	$Re = 1,128 (A)^{0,5} / L$	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,77	0,77	0,76	0,76	0,76	0,76	0,77	0,77	0,76	0,76	0,77	0,77	0,76	0,77	0,77
Relación de circularidad:	1	$Rc = 4 \pi A / (P)^{0,5}$	0,51	0,56	0,60	0,61	0,63	0,62	0,59	0,61	0,63	0,62	0,63	0,62	0,59	0,61	0,63	0,62	0,61	0,65	0,66	0,65
Longitud del Cauce Principal:	km	Lcp	16,84	16,31	15,25	16,25	15,33	15,50	14,96	16,25	15,33	15,50	15,33	15,50	14,96	16,25	15,33	15,50	14,96	15,27	15,19	14,97
Longitud Total de Cauces:	km	Ltc	64,32	61,13	57,91	59,68	57,47	57,23	60,28	59,68	57,47	57,23	57,47	57,23	60,28	59,68	57,47	57,23	58,45	57,23	55,98	56,14
Densidad de drenajes:	1	$Dd = ltc / A$	0,8	0,728	0,688	0,710	0,688	0,680	0,715	0,710	0,688	0,680	0,688	0,680	0,715	0,688	0,680	0,680	0,694	0,680	0,665	0,668
Orden de drenaje:	1		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Segmentos totales:	1		55	55	55	55	53	49	55	55	53	49	55	55	53	55	53	51	53	54	51	53
	1		28	28	28	28	27	25	28	28	27	25	28	28	27	25	28	27	26	27	26	27
	km		28,55	27,02	25,54	26,40	25,54	29,63	29,18	26,40	25,54	29,63	29,18	29,18	26,11	25,77	27,71	29,92	27,69	27,77	25,29	29,04
	1	Orden 1	13	13	13	13	12	13	12	13	12	13	12	13	12	13	12	14	14	15	12	15
	km	Orden 2	20,19	18,91	18,63	18,19	18,63	16,39	17,84	18,19	18,63	16,39	17,84	17,84	17,82	17,39	18,01	17,80	18,44	18,44	14,71	17,27
	1	Orden 3	7	7	7	7	7	4	8	7	7	4	8	7	7	4	5	5	5	5	7	7
	km	Orden 4	8,56	8,45	7,24	8,20	7,24	4,67	7,44	8,07	7,24	4,67	7,44	7,44	8,07	7,23	4,73	5,00	4,69	4,69	7,31	7,38
	1		7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	7
	km		7,02	6,75	6,50	6,90	6,50	6,54	5,83	6,90	6,50	6,54	5,83	6,54	6,61	6,44	6,44	5,72	6,41	6,41	6,19	6,20
Elevación mayor de la cuenca:	m.s.n.m.	Hm	3220,66	3232,65	3254,00	3232,14	3253,00	3234,00	3196,00	3232,14	3253,00	3234,00	3196,00	3196,00	3232,14	3253,00	3234,00	3195,00	3223,89	3249,00	3223,00	3189,00
Elevación menor de la cuenca:	m.s.n.m.	Hm	1564,23	1569,32	1635,00	1568,26	1635,00	1618,00	1638,00	1568,26	1635,00	1618,00	1638,00	1638,00	1592,43	1637,00	1618,00	1638,00	1606,99	1636,00	1640,00	1636,00
Elevación media de la cuenca:	m.s.n.m.	$E = (Hm+Hm) / 2$	2392,45	2400,99	2444,50	2400,20	2444,00	2426,00	2417,00	2400,20	2444,00	2426,00	2417,00	2417,00	2412,14	2444,50	2426,00	2416,50	2415,44	2442,50	2431,50	2412,50
Elevación de frecuencia media:	m.s.n.m.	Em	2460,60	2461,56	2489,79	2461,91	2489,72	2472,55	2443,37	2460,60	2461,56	2489,72	2472,55	2443,37	2462,67	2489,84	2472,71	2445,93	2463,29	2490,04	2473,26	2445,93
Elevación más frecuente:	m.s.n.m.	Em	3140,92	3141,33	2750,00	3141,07	2750,00	3142,00	3123,00	3140,92	3141,33	2750,00	3142,00	3123,00	3140,92	2750,00	3142,00	3123,00	3140,92	2750,00	3142,00	3122,50
Cota Inicial Cauce Principal:	m.s.n.m.	HmC	2591,20	2588,72	2653,00	2611,24	2683,00	2671,00	2631,00	2611,24	2683,00	2671,00	2631,00	2631,00	2627,53	2673,00	2661,00	2618,00	2632,89	2684,00	2672,00	2618,00
Cota Final Cauce Principal:	m.s.n.m.	HmC	1564,23	1569,32	1635,00	1568,26	1635,00	1618,00	1638,00	1568,26	1635,00	1618,00	1638,00	1638,00	1592,43	1637,00	1618,00	1638,00	1613,05	1636,00	1640,00	1636,00
Pendiente del Cauce Principal:	%	$S_{cp} = (HmC-HmC) / Lcp$	6,10	6,25	6,67	6,42	6,83	6,79	6,64	6,42	6,83	6,79	6,64	6,64	6,53	6,85	6,79	6,59	6,68	6,90	6,90	6,72
Pendiente media de la cuenca:	%	S_m	71,10	65,64	55,85	61,15	55,85	54,15	52,83	61,15	55,85	54,15	52,83	52,83	55,94	51,58	51,53	50,38	51,17	48,47	48,34	47,54
Índice de Rugosidad:	1	$S_{rp} = (HmC-HmC) * Dd$	1269,76	1210,21	1114,34	1181,63	1105,44	1098,79	1113,49	1181,63	1105,44	1098,79	1113,49	1113,49	1143,38	1091,06	1094,02	1080,78	1099,80	1072,92	1056,62	1061,39

