

Morfología interpretativa de alta resolución usando datos LiDAR en la cuenca hidrográfica del río Paute en Ecuador

Sellers Chester¹, Buján Sandra², Corbelle Eduardo³, Miranda David⁴

1 Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador/Universidad del Azuay
Av. 24 de mayo 7-77/Azuay/Ecuador
csellers@uazuay.edu.ec

2, 3,4 Laboratorio do Territorio/Universidad Santiago de Compostela
27002 Lugo/Galicia/España
laborate@usc.es

RESUMEN

Este estudio aborda el análisis morfológico de la cuenca del río Cutilcay (provincia del Azuay, Ecuador), a partir de datos LiDAR y su integración en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para la cuantificación de sus variables morfológicas. El análisis de los datos LiDAR, el estudio y la definición de los parámetros morfológicos útiles han permitido generar índices y parámetros que permiten caracterizar la cuenca. El estudio demuestra que los datos LiDAR permiten alcanzar resultados con alta precisión, asociada también a la obtención de modelos de terreno más precisos y visualmente más estilizados de los disponibles hasta el momento. Así, también se muestra la importancia de integrar esta tecnología para la generación de información que permita comprender la dinámica territorial de las cuencas hidrográficas en Ecuador.

Palabras clave: **Lidar, morfología, régimen hídrico, cuenca hidrográfica.**

ABSTRACT

This study addresses the morphological analysis of the Cutilcay river basin (Azuay province, Ecuador), based on LiDAR data and its integration into a Geographic Information System (GIS) for the quantification of its morphological variables. Analysis of the LiDAR data, the study and the definition of the useful morphological parameters have allowed the generation of indicator's and parameters that allow us to characterize the basin. This study demonstrates that the LiDAR data allows to achieve results with a high precision, also associated with the obtaining of more accurate and visually more stylized terrain models available to date. Thus, it is also shown the importance of integrating this technology for the generation of information to understand the territorial dynamics of watersheds in Ecuador.

Keywords: **Lidar, morphology, water regime, hydrographic basin.**

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años en Ecuador, la mayoría de instituciones, organizaciones sociales y productivas, así como la sociedad civil en general, han empezado a ver con mucha preocupación cómo avanza sin control la degradación de las cuencas hidrográficas en los diferentes contextos, sean estos locales, regionales, nacionales e internacionales, cuyos efectos inmediatos se visibilizan en la erosión acelerada de los suelos, la disminución de la producción y la vulnerabilidad hídrica.

De ahí que es fundamental realizar estudios de régimen hídrico, morfología general e inventario hídrico, entendidos como las herramientas para determinar las características de las fuentes, su extensión y calidad del agua para su utilización y control; pero a su vez, la disponibilidad en cantidad y calidad en determinado lugar y en un período de tiempo para satisfacer las demandas identificables (consumo multifinanciado, humano, agrícola, energético, etc.). Por tanto, un inventario debe ir más allá de la sola dimensión técnica, es decir, debe considerarse como el inicio de un proceso que impulsa la gestión integrada del agua. Por ello no se debe perder de vista, las estrategias de concertación y decisión política que deben llevarse a cabo por todos los actores de un espacio socio territorial.

Los mapas morfológicos difieren de los topográficos en que contienen un elemento de interpretación genética (Jones et al., 2007). Por ejemplo, a diferencia de lo que ocurre en los mapas topográficos, una rotura en pendiente no se muestra por un conjunto de contornos muy próximos entre sí, sino por una línea codificada que indica un cambio en el gradiente, en particular, en la forma de relieve.

Tradicionalmente, la obtención de cartografía geomorfológica implicaba salidas de campo buscando características de interés con el soporte de mapas a gran escala o fotografías aéreas (Jones et al., 2007; Metternicht et al., 2005) Además, la morfología de cuencas siempre ha contado con cartografía de baja resolución espacial, por ejemplo mapas topográficos escala 1:200.000, por lo que los datos derivados no son de gran precisión. A todo esto hay que añadirle los problemas inherentes a accesibilidad, tiempo y logística. Todas estas circunstancias dificultan el registro y actualización de la información.

La tecnología LiDAR (Ligth Detection and Ranging) permite obviar muchos de estos limitantes. Los datos LiDAR proporcionan una alta resolución espacial gracias a la densidad de puntos obtenida durante el levantamiento (considerándose alta resolución aquellos datos con 5 - 10 puntos por metro cuadrado, donde resoluciones más altas pueden obtenerse con vuelos comisionados) unida a una elevada precisión altitudinal; (considerada como alta precisión vertical aquella entre 10 cm ± 25 cm). El ratio de levantamiento (área / tiempo) versus métodos tradicionales, son una de las ventajas más importantes que presentan los levantamientos LiDAR, llegando a levantar hasta 90 km² en una hora (Suárez et al., 2005). Estas ventajas a su vez están reforzadas en la actualidad por los SIG, que permiten que los datos LiDAR sean procesados y visualizados de forma rápida y eficiente.

En la actualidad, se trata de una de las tecnologías más empleadas para la adquisición de datos terreno. Esto a su vez repercute en la aparición de nuevas aplicaciones para esta información, entre las que se encuentran la generación de Modelos Digitales de Terreno (MDT), Modelos Digitales de Superficie (MDS), caracterización morfométrica de cuencas, entre muchas otras.

Este estudio pretende ser la base de partida de una investigación doctoral para la modelización predictiva e investigación

del riesgo de inundación en cuencas, sub-cuencas y micro cuencas andinas, específicamente la cuenca del río Paute en Ecuador (Figura 1). Los datos de base LiDAR para la modelización fueron obtenidos por medio de la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), organismo estatal que tiene la competencia del manejo de cuencas hidrográficas en Ecuador. Los datos corresponden al Proyecto para el Uso Multifinanciado del Agua (PUMA), el cual incluye la micro-cuenca del río Cutilcay. Esta es una de las micro-cuencas más importantes dentro del sistema, y además reúne todas las características representativas de la típica micro-cuenca dentro del subsistema de la cuenca del río Paute.

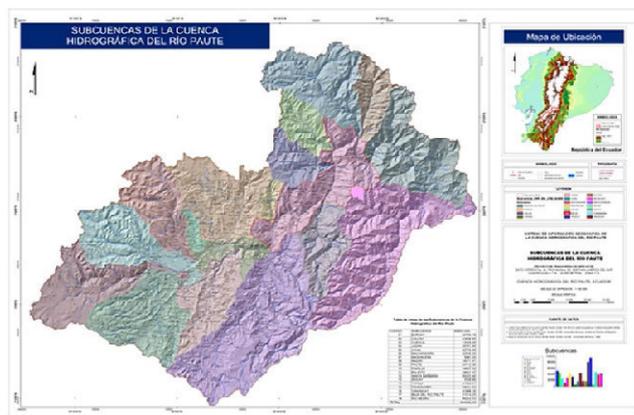


Figura 1.- Ubicación general sub cuenca río Paute

El elemento básico de cualquier representación digital de la superficie terrestre son los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE). Constituyen la base de muchas aplicaciones en ciencias de la tierra, ambientales y las ingenierías. Un MDE es un modelo digital de una superficie topográfica representada por puntos regulares o irregulares con valores de elevación (Moreno Brotóns et al., 2010; Höhle y Potuckova, 2011). Dentro de este tipo de modelos se encuentran los Modelos Digitales del Terreno (MDT, los cuales representan la superficie topográfica libre de objetos, es decir, representan al terreno (suelo) (Höhle y Potuckova, 2011).

Por otro lado, un Modelo Digital de Superficie (MDS) es la presentación digital topográfica de puntos regulares o irregulares representando los objetos sobre el terreno, por ejemplo vegetación o edificaciones (Höhle y Potuckova, 2011).

Los métodos para generar un MDT pueden clasificarse en dos grupos (Moreno Brotóns et al., 2010; Nelson et al., 2009):

- Métodos directos, topografía tradicional o con GPS.
- Métodos basados en sensores remotos, fotogrametría o más recientemente radar y LiDAR.

Los métodos directos son más exactos y precisos, pero caros y limitados a poca superficie. Los métodos basados en sensores remotos permiten abarcar mayor extensión, aunque con una exactitud menor. Tradicionalmente, el método más habitual para generar un MDT ha sido la interpolación a partir de curvas de nivel digitalizadas de mapas topográficos. Para la micro-cuenca del Cutilcay, la información de mejor escala disponible corresponde a 1:25 000.

TECNOLOGÍA LIDAR

LiDAR es un sistema láser activo, montado generalmente sobre una aeronave, capaz de emitir pulsos de luz láser en la banda del espectro electromagnético entre el ultravioleta y el infrarrojo cercano (500 - 1500 nm). Posteriormente la señal

reflejada por la superficie barrida es capturada y se calcula el tiempo empleado por cada una de las señales emitidas (pulsos) en recorrer el espacio que separa al transmisor de la superficie del terreno. El tiempo medido junto con la velocidad de la luz permiten calcular la distancia entre el sensor y la superficie terrestre. Un receptor GPS proporciona la posición y la altura del avión en cada momento, y un sistema inercial (INS) informa de los giros del avión y su trayectoria. Se obtiene así de forma casi instantánea una nube muy densa de puntos georreferenciada cuyas coordenadas (x, y, z) quedan registradas con gran precisión (Baltsavias, 1999; Hodgson et al., 2005). Los errores de medición están en torno a 15 y 25 cm en altimetría y 50-100 cm en planimetría, siendo estos muy dependientes del relieve del terreno y el equipo utilizado (Nelson et al., 2009).

Adicionalmente al registro de coordenadas, los sensores LiDAR registran valores de intensidad. La intensidad es el cociente entre la cantidad de energía retro-dispersada procedente de los objetos, captada por el sensor, y la cantidad de energía total emitida (Song, Han, Yu, & Kim, 2002).

Los productos fundamentales generados a partir de datos LiDAR según algunos autores (Liu et al., 2007; Baltasavias, 1999) son:

- Modelo Digital del Terreno: obtenido de la interpolación de puntos identificados como pertenecientes al terreno (base de la modelización hidrológica/hidráulica).
- Modelo Digital de Alturas de Objetos: obtenido de la diferencia del modelo digital de superficies y el MDT. Este modelo proporciona la altura de los objetos sobre el terreno.
- Imagen de intensidades: A partir de valores de intensidad asociados a cada punto y mediante un proceso de interpolación se obtiene una imagen de intensidades semejante a la banda del infrarrojo de las ortoimágenes o imágenes de satélite.

CARACTERIZACIÓN DE ERRORES EN UN MDT

Un MDT es la representación visual y matemática de valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve. En los MDT existen dos cualidades esenciales: la precisión vertical/horizontal, y la resolución espacial. Ambas cualidades varían dependiendo del método usado para generar el MDT. Como cualquier otro conjunto de datos espaciales, tiene errores, afectando también sus aplicaciones y usos.

Estos errores en el MDT pueden estimarse comparando un conjunto de valores conocidos de altitudes versus los correspondientes valores en el modelo (Höhle y Höhle, 2009). Según Höhle y Höhle (2009), si se asume una distribución normal de datos y no hay valores atípicos (outliers), se puede aplicar un conjunto de estadísticos para evaluar este error. Habitualmente el error medio cuadrático, media del error y la desviación típica. De lo contrario, si los datos no siguen una distribución normal se deberían usar estadísticos robustos, menos sensibles a los efectos generados por outliers; por ejemplo cuantiles muestrales de la distribución del error (Höhle y Höhle, 2009). Los cuantiles muestrales son estimadores no paramétricos de la distribución basados en muestras de observaciones independientes (x_1, x_2, \dots, x_n) de la distribución.

Por tanto, si los datos siguen una distribución normal, el error medio cuadrático es el descriptor tradicional más utilizado para cuantificar los errores en un MDT. Este estadístico tiene como principales inconvenientes que requiere valores de elevación real (puntos de control campo) y que no informa

acerca de la distribución espacial de los errores y su posible autocorrelación (Moreno Brotóns et al., 2010; Meng et al., 2010; Felicísimo, 1994). La directiva INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe) menciona que cuando se conoce a priori el valor terreno de referencia (Z_t) se puede utilizar el método del error medio cuadrático, que se define en la fórmula 1.

$$\sigma^2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_{mi} - Z_t)^2}$$

Formula 1.- Error Medio Cuadrático

Dónde:

- N Tamaño de la muestra
- Z_{mi} El valor obtenido de la muestra en un punto.
- Z_t El valor terreno de referencia.

MORFOMETRÍA DE CUENCAS

El estudio de las características morfométricas se inició con el padre de la hidrología moderna en los Estados Unidos de Norte América, Robert Hermer Horton a través de dos artículos de referencia internacional, Drainage basin Characteristics (Horton, 1932) y Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology (Horton, 1932). Estos estudios fueron transformados de diferentes análisis puramente cualitativos y deductivos, a estudios científicos, cuantitativos y rigurosos capaces de suministrar datos hidrológicos fáciles de estimar (Strahler, 1957).

En 1952, Arthur Newell Strahler, modificó y mejoró el sistema para el análisis de red propuesto originalmente por Horton, donde se clasifican los órdenes de los cauces de acuerdo a su jerarquía y a la potencia de sus afluentes. Convirtiéndose en uno de los sistemas de clasificación más utilizados mundialmente.

Es fundamental la comprensión de parámetros y coeficientes en el concepto de cuenca hidrográfica: Entendiéndose por cuenca hidrográfica el área o superficie del terreno que aporta sus aguas de escorrentía a un mismo punto de desagüe (Wani y Garg, 2009). Esta transformación depende de las condiciones climáticas y características físicas de la cuenca (Horton, 1945; Horton, 1932).

La morfometría de cuencas se considera una de las herramientas más importantes en el análisis hídrico (Patton y Baker, 1976). El propósito es determinar índices y parámetros que permiten conocer la respuesta hidrológica y el comportamiento en esta unidad de análisis. Se trata por tanto del estudio cuantitativo de las características físicas de una cuenca hidrográfica, y es de gran importancia en el análisis de la red de drenaje. También resulta de gran utilidad ya que permite el estudio de la semejanza de los flujos de diferentes tamaños (García Ruiz et al., 1987) con el propósito de aplicar los resultados de los modelos elaborados a pequeña escala a prototipos de gran escala (Splinter et al., 2011).

Otro aspecto interesante reside en los objetivos fundamentales de estos estudios, dirigidos a inferir posibles picos de crecidas o avenidas en caso de tormentas, cuyas repercusiones de tipo socio-económico motivan especial atención a la hora de utilizar y ocupar el territorio, o en el momento de definir medidas de tipo estructural para el control de crecidas.

La influencia de estos factores sobre la transformación de la precipitación en escorrentía es deducible cuantitativamente. Es posible definir cierto número de índices, susceptibles de

servir, al menos de referencia, en la clasificación de cuencas y facilitar los estudios de semejanza (Strahler, 1957; Strahler, 1952). Las propiedades morfométricas de una cuenca proporcionan una descripción física espacial permitiendo realizar comparaciones entre distintas cuencas. Además proporcionan conclusiones preliminares sobre las características ambientales del territorio. La morfometría particular de cada cuenca hidrográfica es proporcional a la posibilidad de cosecha hídrica; ante eventos climáticos, posibles respuestas a los mismos, escorrentía superficial, expresada en términos de caudales, incidencia en el transporte de sedimentos y nutrientes a lo largo de los ecosistemas que la integran. Actualmente, herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), procesos de interpretación de imágenes satelitales, permiten realizar la caracterización espacio temporal de las propiedades morfométricas de las cuencas hídricas y de las redes de drenaje.

El análisis de características morfométricas funcionales de una cuenca por parámetros de forma, relieve y red de drenaje es básico en la modelación hidrológica (Strager et al., 2010; Montgomery et al., 1998). Estos parámetros son muy importantes en el estudio y comportamiento de los componentes del ciclo hidrológico.

II. MÉTODO

ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS

La micro-cuenca Cutilcay (Figura 2) localizada en el cantón Paute provincia de Azuay, Ecuador, tiene un área de 485,6 ha, abastece a 8 sistemas de agua potable, 6 corresponden a las comunidades de la micro-cuenca con una población de 662 familias (un sistema abastece a la comunidad de Plaza Pamba que está fuera del perímetro de la micro cuenca, 80 familias, el sistema de agua potable del centro urbano de Paute con 1 253 familias). La micro cuenca en total provee de agua para consumo humano a 1 995 familias.

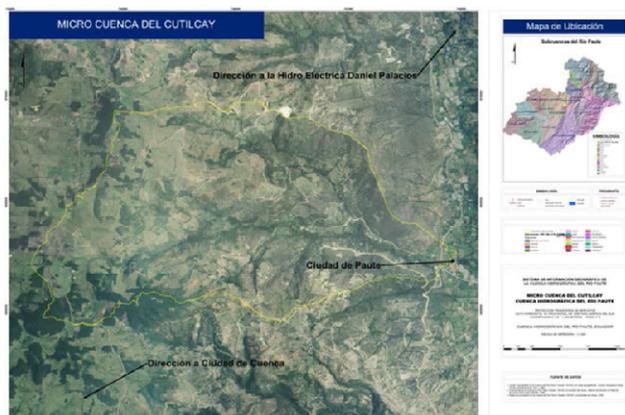


Figura 2.- Micro cuenca río Cutilcay

DATOS LIDAR

Los datos LiDAR empleados en este proyecto fueron capturados con un sensor Leica ALS50 II en el mes de Agosto del 2012 (Tabla I).

TABLA I
CARACTERÍSTICAS SENSOR LIDAR

Sensor de Captura de Datos LiDAR	
Sensor	ALS50 II
Número de serie	SN 48
Altura de vuelo	200m - 6 000m
Frecuencia de pulsación	Hasta 150 000 Hz (150 000 pulsos/seg)
Precisión a priori	Hasta 10cm en altimetría
Número de retornos	4
Campo de visión (FOV)	10°- 75°
Captura de intensidades	Una por pulso
Tecnología MPiA (Multiple Pulses in Air)	Si
Densidad de puntos (puntos / m ²)	Hasta 12

ORTO-IMÁGENES

Las imágenes empleadas corresponden a ortofotografía escala 1:5000 generada a partir de la toma de fotografía aérea 1:20000 con un GSD (Ground Sample Distance) de 30 cm, para la zona sierra de Ecuador.

En la Figura 3 se presenta el flujo de trabajo para el procesamiento de los datos.

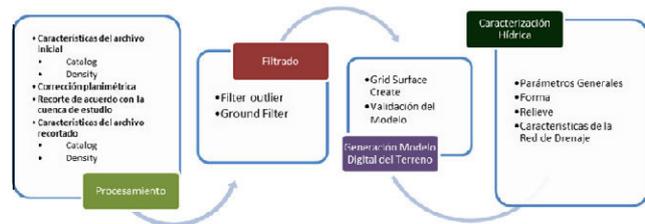


Figura 3.- Orden metodológico de actividades

PROCESAMIENTO DATOS LIDAR

Características archivos LiDAR iniciales

El primer paso para trabajar con datos LiDAR es conocer las características de éstos. En este estudio se han realizado dos análisis empleando el software libre FUSION: caracterización general de datos (Catalog), y un análisis de la distribución de puntos (Switch de la herramienta Catalog-Density).

Catalog.- Utilizando el comando Catalog de FUSION producimos un conjunto de informes que describen varias e importantes características de los datos LiDAR: valores de coordenadas máximas y mínimas, elevación máxima registrada, número de puntos registrados, densidad nominal de retornos en cada pasada, etc.

Switch: density.- Asimismo tiene una opción adicional denominada Density, la cual permite crear una imagen donde cada pixel almacena el número de retornos LiDAR en esa localización. Conjuntamente con la imagen se presenta una tabla resumen de densidades codificada por colores.

Corrección Planimétrica

El correcto acoplamiento entre diferentes pasadas es de suma importancia en fotogrametría y en el empleo de datos procedentes de sensores remotos en general, y más aún en el campo de los levantamientos mediante sensores LiDAR. Existen métodos para acometer este propósito, por ejemplo procedimientos de filtrado y suavizado, segmentación y clustering (Bakula et al., 2014; Höhle y Øster Pedersen, 2010; Wu et al., 2008).

Para llevar a cabo la corrección se establecieron una serie de polígonos representativos, claramente identificables en zonas de solapamiento entre pasadas. El primer grupo de polígonos, considerados “verdad terreno”, se obtuvo digitalizando sobre la ortoimagen en verdadera proyección (“true orto”) (Figura 4a). Posteriormente, los polígonos fueron digitalizados sobre cada MDS derivados de las pasadas (Figura 4b). Seguido, se estableció el centroide de cada polígono para los dos grupos, calculándose las diferencias entre centroides “verdad terreno” y los derivados de los MDS (Ilustraciones 4c y 4d), corrigiendo el desplazamiento en base a los valores obtenidos. Para realizar este proceso se utilizó el software propietario ESRI® ArcMap™ 9.3.

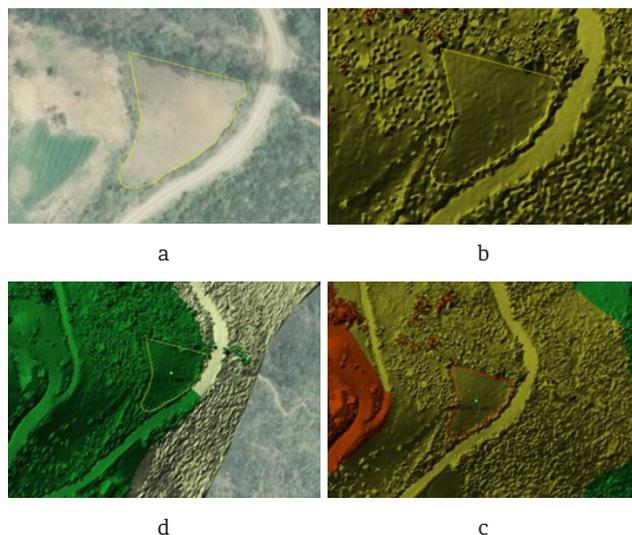


Figura 4.- Identificación y digitalización de áreas comunes entre las pasadas 38 y 41: a) Digitalización true orto; b) Comparación con MDT; c) Área y centroide pasada 41; d) Área y centroide pasada 38

Corrección Altimétrica

Para la corrección altimétrica se realizó un ajuste fino por mínimos cuadrados. Este procedimiento parte de la selección de varios polígonos semejantes en los TIN´s generados para cada pasada que se solapa. Usando los polígonos creados para el proceso de rectificación planimétrica se extraen los puntos LiDAR y se obtienen a partir de los valores de sus coordenadas (x, y, z) la media, mediana, desviación típica y el error medio cuadrático. De los resultados de cada pasada se determinan sus diferencias y se realiza el ajuste altimétrico (Bakula et al., 2014; Wu et al., 2008; Kraus y Pfeifer, 2001).

Recorte Información

Utilizando el software FUSION se procede con el corte de datos en el contorno aproximado de la cuenca, y un archivo de tipo shape correspondiente a la delimitación a nivel 6 pfafstetter¹ perteneciente a la delimitación hidrográfica de Santiago (SENAGUA).

GENERACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MDT

Los datos resultantes del recorte son sometidos a dos tipos de filtros: el primero, FilterData, para eliminar valores anómalos (outliers), mientras que el segundo

Groundfilter se emplea para seleccionar puntos terreno. Seguidamente se genera el MDT utilizando el comando de FUSION GridSurfaceCreate, mediante el cual se obtiene una superficie continua a partir de un conjunto discreto de puntos mediante un proceso de interpolación. Los comandos mencionados se detallan a continuación:

FilterData. Genera un nuevo archivo de datos con los retornos que cumplan los requisitos establecidos por el filtro. El uso más común es eliminar outliers de los archivos LiDAR. Tiene tres parámetros principales: tipo de filtro a usar (FilterType), en este caso outlier; FilterParms, para el caso particular del filtro outlier corresponde con el multiplicador aplicado a la desviación estándar, de tal forma que se eliminarán aquellos retornos cuya elevación supere el umbral derivado de: elevación media ± FilterParms * desviación estándar de las elevaciones; y WindowSize, tamaño de la ventana usado para calcular la media y desviación estándar de las elevaciones.

GroundFilter. Esta herramienta permite filtrar la nube de datos e identificar puntos terreno. Emplea el algoritmo de predicción lineal, adaptación del desarrollado por (Kraus y Pfeifer, 1998). En este estudio se utilizaron los parámetros por defecto, con una ventana de filtrado de 5 metros y 8 iteraciones.

GridSurfaceCreate. Crea un modelo de superficie regular usando colecciones de puntos aleatorios. El modelo de superficie se almacena en formato DTM (Data Terrain Model).

Validación modelo.

Para cuantificar el error introducido en la generación del MDT se han utilizado las zonas de muestreo DGPS, y datos obtenidos mediante selección de puntos terreno LiDAR en la ortofotografía. La cuantificación del error se obtuvo comparando el conjunto real de valores elevación con los obtenidos del modelo generado. El error en elevación en un punto i está definido como la diferencia entre la elevación del punto en el modelo zi y su valor real z(i), calculando el Error Medio Cuadrático (EMC).

CARACTERIZACIÓN RÉGIMEN HÍDRICO (MORFOMETRÍA)

Descripción general de la cuenca

La micro-cuenca de Cutilcay, situada en el término provincial del Azuay, parroquia Paute pertenece a la cuenca del rio Paute inmersa en la demarcación hidrográfica de Santiago zonal 6 (Tabla II).

TABLA II
DATOS GENERALES MICRO-CUENCA

Nombre de la cuenca	Termino municipal	Codificación UH Pfafstetter						Punto desagüe	
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Coor UTM X	Coor UTM Y
Cutilcay	Paute	4	49	9	8	2	5	747709,9	9693410,79

Parámetros generales

Recogen los aspectos básicos que representan la cuenca, constituyen la información mínima básica necesaria para conocer la naturaleza, características y comportamiento de la micro-cuenca. A continuación se especifican los parámetros generales tenidos en cuenta en este estudio:

Área de la cuenca. La micro-cuenca está definida por el espacio delimitado por la curva del perímetro. La divisoria de aguas de naturaleza topográfica representa una línea imagi-

¹ Proceso consistente en delimitar unidades hidrográficas dividiendo y codificando jerárquicamente las unidades por tipología: cuenca, sub-cuenca y micro-cuenca interna, desde el ámbito continental (Nivel 1), hasta los niveles 2, 3, 4, 5 y 6 en todo el territorio de la Cuenca Amazónica (SENAGUA).

naría que separa laderas opuestas de un punto de elevación, en donde las aguas de escorrentía de cada ladera fluyen a cauces diferentes (Beven y Kirkby, 1979).

Se representa por:

Área (A) (Km²): Superficie encerrada por la divisoria de aguas.

Perímetro de la cuenca. Informa sucintamente sobre la forma de la cuenca. Para una misma superficie, los perímetros de mayor valor, se corresponden con cuencas alargadas, mientras que los de menor valor se corresponden con cuencas redondeadas. Se considera como la longitud de los contornos de la cuenca y está ligada a la irregularidad del lugar a estudiar (Beven y Kirkby, 1979; Strahler, 1957; Horton, 1945).

Se representa por:

Perímetro (P) (km): Medición de la línea envolvente de la cuenca hidrográfica, por la divisoria de aguas topográficas.

Longitud Axial. Viene definida por la longitud del cauce principal, siendo equivalente a la distancia recorrida entre el de desagüe de la cuenca y el punto situado a mayor distancia topográfica aguas arriba (Tarolli y Dalla Fontana, 2007; Strahler, 1957; Horton, 1945).

Se representa por:

Longitud Axial (La) (km): Distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca. Es el eje de la cuenca.

Ancho de la cuenca. Se define como la relación entre el área y la longitud de la cuenca.

Se representa por:

Ancho promedio (Ap) (km): Relación entre la superficie de la cuenca y la La .

Ancho nominal. Generado a partir de la identificación del punto donde el ancho de la cuenca obtiene el valor más elevado.

Se representa por:

Ancho nominal (An) (km): Selección del punto donde la cuenca alcanza el ancho máximo.

Cota máxima y mínima. Selección de las cotas máxima y mínima dentro del contorno de la cuenca.

Desnivel de altitudinal. Se define por el valor obtenido de la diferencia entre la cota máxima y mínima del área de estudio.

Se representa por:

Desnivel Altitudinal (DA) (msnm): Valor de la diferencia entre la cota más alta de la cuenca y la más baja.

$$DA=HM-Hm$$

Formula 2.- Densivel Altitudinal

Altitud media. Valor muy importante para los estudios de análisis hídricos, siendo la altura de carga hipotética potencial que influye sobre los volúmenes de exceso de lluvia, considerándose como si estuvieran uniformemente distribuidas sobre la superficie.

Parámetros de forma

La forma de la cuenca es determinante para entender su comportamiento hidrológico. Cuencas con la misma área pero de diferentes formas presentan respuestas hidrológicas e hidrogramas diferentes. Los parámetros de forma tomados en cuenta son:

Factor forma. El factor o relación de forma de Horton indica cómo se regula la concentración de escorrentía superficial. (Jardí, 1985; Strahler, 1957; Strahler, 1952). Este factor manifiesta la tendencia de la cuenca a crecidas: cuando el factor forma (Rf) es similar a 1, representa una cuenca de forma redondeada (Tabla III); la cuenca con Rf bajo, se caracteriza por ser una cuenca alargada, con un colector de mayor longitud que la totalidad de los tributarios, sujeta a crecientes de menor magnitud; o una cuenca de forma triangular, con dos vértices en las cabeceras, afluentes de similar longitud y sincronismo en la llegada, provocará crecidas más significativas.

Se representa por:

Factor de forma (Rf): Relación entre el ancho promedio de la cuenca y la La. Es un factor adimensional.

$$Rf = \frac{A}{La^2}$$

Formula 3.- Relación de Forma Horton

Los valores interpretativos del factor de forma de Horton, Tabla III:

TABLA III
RELACIÓN FORMA HORTON (STRAHLER, 1957).

Rango de Valores	Forma de la cuenca
< 0,22	Muy alargada
0,22 - 0,30	Alargada
0,3 - 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

Coefficiente de compacidad de Gravelius (Kc). Define la forma y la superficie que abarca la cuenca, teniendo influencia sobre la escorrentía y la marcha del hidrograma resultante de una precipitación (de Llano y Mintegui Aguirre, 1986; Strahler, 1957). El Kc es adimensional y permite relacionar el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área equivalente al de la cuenca, y de esta manera representar esta característica (Gaspari et al., 2009; Strahler, 1957). Para explicar el Kc de una cuenca, se ha propuesto su comparación con una cuenca ideal de forma circular (Tabla IV), con sus tributarios dispuestos radialmente y que desembocan en el punto central (Wani y Garg, 2009; de Llano y Mintegui Aguirre, 1986; Strahler, 1957).

Se representa por:

Coefficiente de compacidad de Gravelius (Kc): Relación entre perímetro (km) y la superficie (km²).

$$Kc = \frac{P}{(2\sqrt{\pi A})}$$

Formula 4.- Coeficiente de compacidad Gravelius.

El Kc está relacionado con el tiempo de concentración, tiempo que tarda una gota de lluvia en moverse desde la parte más lejana de la cuenca hasta la salida. En este momento ocurre la máxima concentración de agua, puesto que están llegando gotas de lluvia de todos los puntos de la cuenca. Según el valor que tome este coeficiente, la cuenca tendrá diferente forma.

TABLA IV
TABLA ÍNDICE COMPACIDAD GRAVELIUS.

Índice Kc	Descripción
1 - 1,25	Redonda - ovalo redonda
1,25 - 1,5	Ovalo redonda - ovalo oblonga
1,5 - 1,75	Ovalo oblonga - rectangular oblonga
> 1,75	Rectangular Oblonga - Muy lobuladas

A medida que su Kc tiende a 1, es decir cuando tiende a ser redonda, la peligrosidad de la cuenca a las crecidas es mayor, las distancias relativas de los puntos de la divisoria con respecto a uno central, no presenta diferencias mayores y el tiempo de concentración es menor, por lo tanto mayor será la posibilidad de que las ondas de crecidas sean continuas (Strahler, 1957; Horton, 1932).

Parámetros de relieve. Los parámetros de relieve son de gran importancia, presentando más influencia sobre el comportamiento hidrológico que los parámetros de forma, y de forma general, de tal manera a mayor relieve o pendiente, los procesos de escorrentía se producen en tiempos menores.

Pendiente media de cuenca (PM). El proceso de degradación al que se ve sometida una cuenca hidrográfica, al igual que el caudal máximo, muy influenciado por la configuración topográfica, debido a que el poder erosivo se manifiesta en mayor o menor grado de acuerdo a los distintos grados de pendiente (Wani y Garg, 2009; de Llano y Mintegui Aguirre, 1986; Strahler, 1957).

Pendiente media del cauce (j). La velocidad de escorrentía de las corrientes de agua en una cuenca hidrográfica depende de la pendiente de los canales fluviales. Cuanto mayor pendiente, mayor velocidad de flujo, por tanto, se convertirá en un factor característico del tiempo de respuesta de la cuenca ante determinada precipitación. (Gaspari et al., 2009; Wani y Garg, 2009; de Llano y Mintegui Aguirre, 1986; Strahler, 1957). Tabla V rangos de pendiente por Strahler (1957a).

Se representa por:

Pendiente media del cauce (j): Relación entre desnivel altitudinal de la cuenca (DA) en Km y la longitud del cauce principal (Ln) en Km.

$$j = \frac{DA}{Ln}$$

Formula 5.- Pendiente media del cauce.

TABLA V
VALORES COMPARATIVOS PENDIENTE MEDIA.

Pendiente media %	Tipología del terreno
<0,5	Muy Plano
0,5 - 1	Plano
1 - 3	Suave
3 - 12	Accidentado medio
12 - 20	Accidentado
20 - 50	Fuertemente accidentado
50 - 75	Escarpado
> 75	Muy escarpado

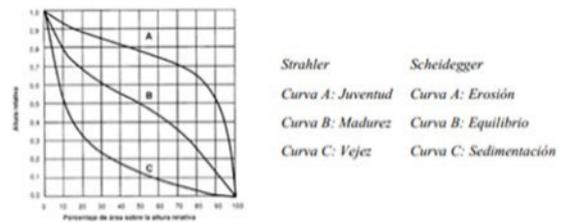
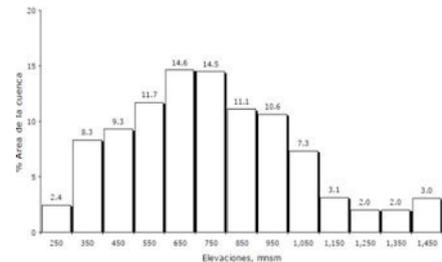


Figura 5.- Descripción forma de curva (Scheidegger, 1991; Strahler, 1957; Strahler, 1952).

Histograma frecuencias altimétricas. Es la representación de la superficie en km² (o en porcentaje), comprendida entre dos cotas. La representación de varios de estos niveles da lugar al histograma de frecuencias altimétricas (Figura 6).



Características de la red de drenaje

Longitud del cauce principal (Ln). Definida por la sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan la cuenca expresada en Km.

Densidad de drenaje (Dd). Definida para cada cuenca como la relación entre la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca con respecto al área de la misma. Caracteriza cuantitativamente la red hidrográfica de la cuenca, por el grado de relación entre el tipo de red y la clase de material predominante (Gaspari et al., 2009; Wani y Garg, 2009; de Llano y Mintegui Aguirre, 1986; Strahler, 1957). En general, una mayor densidad de escorrentía indica mayor estructuración de la red o bien mayor potencial erosivo.

Se representa por:

Densidad de drenaje (Dd) establecida por Horton: cociente entre el sumatorio de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan la cuenca (Ln) y el área total de la cuenca (A).

$$Dd = \frac{L}{A}$$

Formula 6.- Densidad de drenaje.

En la Tabla VI se establecen factores de densidad drenaje de cuencas según Strahler / Horton.

TABLA VI
DENSIDAD DE DRENAJE

Densidad de Drenaje (Km/Km ²)	Categoría
< 1	Baja
1 a 2	Moderada
2 a 3	Alta
> 3	Muy Alta

Sin tener en cuenta otros factores del medio físico, cuanto mayor sea la densidad del drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo.

Tiempo de concentración (Tc). Tiempo que tarda el flujo superficial en contribuir al caudal de salida, desde el punto más alejado hasta la desembocadura de la cuenca y depende de la forma de la cuenca. A partir de información antecedente de siete cuencas rurales estadounidenses, con canales bien definidos y pendientes pronunciadas, se desarrolló una ecuación empírica (Chow et al., 1994; Kirpich, 1940) (Formula 7).

Se representa por:

$$T_c = 0.01947 L^{0.11} S^{-0.385}$$

Formula 7.- Tiempo de concentración.

Donde: TC es el tiempo de concentración en minutos; L la longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida en metros y S la pendiente promedio de la cuenca en metros.

Relación de bifurcación (Rb). Permite inferir sobre posibles crecidas en el sistema. Valores bajos de esta relación se asocian con cuencas muy bien drenadas que a su vez pueden generar crecidas más violentas (Strahler, 1957; Horton, 1945). El valor típico, se establece entre 3 y 5 en cuencas donde la estructura geológica no distorsione el patrón de drenaje natural (Strahler, 1957).

$$R_b = \frac{Nu}{Nu + 1}$$

Formula 8.- Relación de bifurcación.

Donde Nu es la cantidad (sumatorio de ocurrencias) de una clase u orden.

Perfil longitudinal. El perfil longitudinal de un río es la línea obtenida a partir de la representación gráfica de las diferentes alturas desde su nacimiento hasta su desembocadura.

Jerarquización red fluvial. Permite obtener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. El orden de los cauces se relaciona con el caudal relativo a un segmento de un canal. En el método Strahler/

Horton, la codificación de cada segmento va en función del número de afluentes. Cada canal tiene un único orden que se corresponde con el mayor que puede tener al final de su recorrido (Strahler, 1957; Horton, 1945).

Orden de la cuenca. Refleja el grado de ramificación del sistema. Un cauce se une con otro de orden mayor; el canal resultante aguas abajo retiene el mayor de los órdenes. El orden de la cuenca es el mismo que el de su cauce principal a la salida (Figura 7).

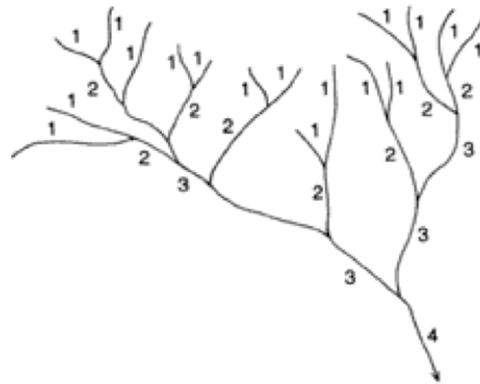


Figura 7.- Orden de cauces (Strahler, 1957)

III. RESULTADOS

RESULTADOS PROCESAMIENTO PREVIO DATOS LIDAR

Un primer resultado fueron las estadísticas de los archivos LiDAR originales, que presentan una densidad nominal media de 1,74 puntos/m² tomando en cuenta todos los archivos (Figura 8). Los 12 archivos LiDAR que representan la cuenca contienen 19.387.313 puntos en total.

Filename	Minimum X	Minimum Y	Minimum Elevation	Maximum X	Maximum Y	Maximum Elevation	Total Returns	Nominal Return Density
CATFM\cutilcay\cutilcay16.las	746684,23	9692709,36	2226,47	748243,49	9693714,89	2710,16	1,039,338	0,66
CATFM\cutilcay\cutilcay14.las	744143,97	9693805,19	2254,7	748274,22	9694735,84	31133,44	3,771,084	0,98
CATFM\cutilcay\cutilcay17.las	744293,31	9694332,51	2314,2	747819,19	9695170,24	3368,43	2,458,098	0,83
CATFM\cutilcay\cutilcay18.las	744688,75	9695005,13	2666,19	746694,91	9695184,2	3088,27	495,004	1,38
CATFM\cutilcay\cutilcay22.las	744109,81	9693521,55	2254,13	748274,07	9694491,93	3130,76	3,812,674	0,94
CATFM\cutilcay\cutilcay29.las	748185,07	9692507,45	2228,44	748215,43	9692582,89	2242,79	7,079	3,09
CATFM\cutilcay\cutilcay30.las	747826,22	9692507,4	2221,56	748227,73	9693522,48	2300,76	281,072	0,69
CATFM\cutilcay\cutilcay31.las	747472,8	9692507,63	2220,4	748274,2	9694055,93	2415,02	723,513	0,58
CATFM\cutilcay\cutilcay32.las	747187,36	9692512,8	2223,78	748273,84	9694263,95	2556,44	1,200,982	0,63
CATFM\cutilcay\cutilcay33.las	746935,67	9692534,47	2234,47	748273,77	9694452,94	2660,08	1,670,039	0,65
CATFM\cutilcay\cutilcay35.las	746340,54	9692512,99	2278,83	747851,98	9694437,35	2809,55	1,760,929	0,61
CATFM\cutilcay\cutilcay39.las	744193,41	9692650,87	2870,05	745777,09	9695178,81	3167,54	2,167,501	0,54
Overall (12 files)	744109,81	96922507,4	2220,4	748274,22	9695184,2	3368,43	19,387,313	1,74

Class value	# returns	Interpretation
0	0	Created, never classified
1	19,387,313	Unclassified
2	0	Ground
3	0	Low Vegetation
4	0	Medium Vegetation
5	0	High Vegetation
6	0	Building
7	0	Low Point (noise)

Figura 8.- Resultado comando Catalog.

El Switch Density devolvió la densidad de puntos/m² en formato ráster. La Figura 9 muestra el resultado de la pasada número 14. Las celdas con densidades de puntos dentro del rango mínimo-máximo además de los lugares donde no existe información (Figura 10).

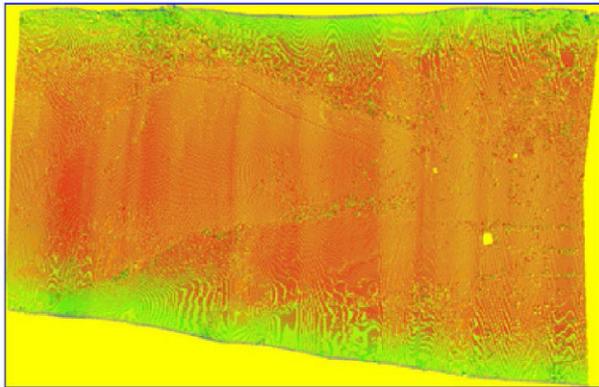


Figura 9.- Resultado Catalog/Density pasada 14.

Return Density			
Density computed using a cell that is 1.00m by 1.00m units (1.00 square meter)			
Density range is 226696.0 to 1150 columns. Catalog_name: density.jpg			
Minimum return density (returns per square meter)	1.00		
Maximum return density (returns per square meter)	1150		
Average return density (returns per square meter)	1.72		
Standard deviation of return density (returns per square meter)	1.90		
Factor		Percentage of Area with Data	Percentage of Total
Color	Classification		
Yellow	Cells with no points (could be outside coverage area)	75.4	56.1
Green	Density less than minimum specification (less than 2.00 points per square meter)	70.57	52.17
Red	Density return specification (2.00 to 8.00 points per square meter)	20.81	8.34
Blue	Density exceeds specification (more than 8.00 points per square meter)	1.13	0.41

Figura 10.- Resultado Catalog/Density pasada 14.

Para la rectificación del desplazamiento entre pasadas, se realizó un proceso de corrección planimétrica. En un primer paso y mediante los resultados de las diferencias entre centroides de polígonos identificados como comunes entre pasadas, se establecieron los valores de los vectores de cambio. Un ejemplo se presenta en la Tabla VII. En este caso, el desplazamiento registrado de la pasada 41 en la coordenada x es de 8,12 m mientras que en la coordenada y es de 15,46 m.

TABLA VII
CORRECCIÓN PASADA 41



	Centroide X	Centroide Y
Ortorectificación	746404,05	9694111,45
Vuelo 41	746412,17	9694126,91
Diferencias	8,12	15,46

También se realizó un proceso de corrección planimétrica fina en base a la función de mínimos cuadrados. Los vectores se obtienen de la resta de los errores medios cuadráticos obtenidos de todos los puntos extraídos de los polígonos comunes de cada pasada con respecto a los valores que se consideran verdad terreno (Tablas VIII a X).

TABLA VIII
DATOS PASADA N° 38

Vuelo	Parámetro	X(m)	Y(m)
38	Media	746410,45	9694126,05
	Mediana	746409,36	9694126,82
	S	8,63	9,75
	EMC	8,63	9,75

TABLA IX
DATOS PASADA N° 41

Vuelo	Parámetro	X(m)	Y(m)
41	Media	746412,87	9694126,66
	Mediana	746411,97	9694127,48
	S	8,73	9,29
	EMC	8,72	9,29

TABLA X
DATOS CONJUNTOS CORREGIDOS

Vuelo	Parámetro	X(m)	Y(m)
Corregidos	Media	746412,17	9694126,91
	Mediana	746411,86	9694127,87
	S	8,73	9,3
	EMC	8,72	9,29

Con la información corregida, se recortaron los datos con el contorno de la micro-cuenca correspondiente a la división pfafetter a nivel 6 con el área basal de la cuenca hidrográfica.

A continuación, se calcularon las estadísticas generales del archivo resultante del proceso de recorte, obteniendo las características básicas de los datos LiDAR en la micro-cuenca. A partir de este proceso se obtuvo que los datos LiDAR tienen una densidad media por m² de aproximadamente 2 puntos/m² y un total de 14.901.490 de puntos en la cuenca de estudio. (Figura 11). El 23,13% de la superficie del área de estudio tiene una densidad menor de 2 puntos/m² mientras que 70,49% de la superficie presenta una densidad entre 2 y 8 puntos/m² y únicamente el 6,38% registra una densidad superior a 8 puntos/m² (Figura 12). Este resultado indica que la nube de puntos LiDAR presenta alta densidad.

File Summary

Filename	Minimum X	Minimum Y	Minimum Elevation	Maximum X	Maximum Y	Maximum Elevation	Total Returns	Normalized Returns Density
C:\TEM\GALAS\cuckoo.las	742349.20	9692874.59	221.27	747946.60	9694837.75	3121.54	14,901,490	1.99

Classification Summary (valid for LAS format files only)

Class value	#Returns	Interpretation
0	0	Class never classified
1	14,901,490	Unclassified

Figura 11.- Resultado Catalog archivo recortado

Return Density

Return Density			
Density computed using a cell that is 1.00m by 1.00m units (1.00 square meter)			
Density range is 2084 returns by 3188 columns. Catalog_name: density.jpg			
Minimum return density (returns per square meter)	1.00		
Maximum return density (returns per square meter)	100.00		
Average return density (returns per square meter)	1.76		
Standard deviation of return density (returns per square meter)	3.94		
Factor	Classification	Percentage of Area with Data	Percentage of Total
Color	Classification		
Yellow	Cells with no points (could be outside coverage area)	N/A	41.4
Green	Density less than minimum specification (less than 2.00 points per square meter)	23.13	12.3
Red	Density return specification (2.00 to 8.00 points per square meter)	70.49	37.24
Blue	Density exceeds specification (more than 8.00 points per square meter)	6.38	3.37

Figura 12.- Resultado Catalog/Density archivo recortado

MODELO DIGITAL DEL TERRENO

El archivo resultante es sometido a un filtrado (filterdata) para eliminar posibles outliers, estableciendo como FilterParms el valor 3. De tal forma que cualquier valor fuera del rango establecido por la media ± 3 desviaciones estándar es eliminado. Luego se aplica el filtro groundfilter para la selección

de los datos que son considerados terreno. Paso seguido se transforman estos datos discretos en una superficie continua utilizando el comando GridSurfaceCreate, y se obtiene el MDT en formato ráster (Figura 13).

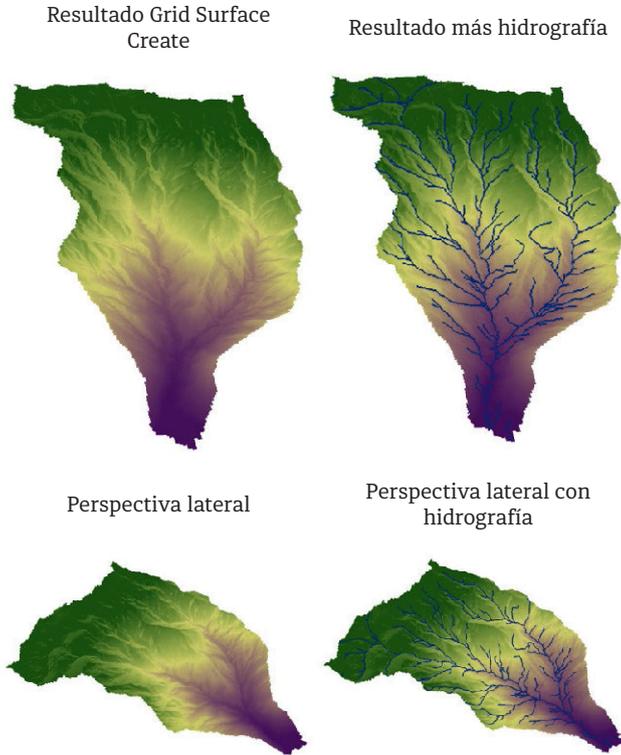


Figura 13.- Modelo Digital del Terreno micro-cuenca de Cutilcay

Para la validación del modelo se realizó un análisis básico en R estadístico para comprobar si la distribución de residuales tiene una distribución normal. Para ello se usa el test de Shapiro-Wilk (Shapiro et al., 1968), conjuntamente con un análisis gráfico usando un diagrama de cuantiles (Figura 14). De los resultados obtenidos se asume que los datos siguen una distribución normal.

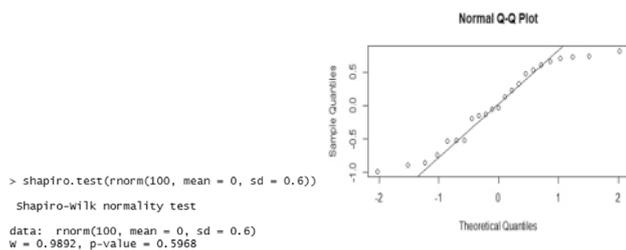


Figura 14.- Análisis R estadístico “distribución residuales”

En la Tabla XI se incluyen los datos recopilados para la validación del MDT. El campo “P_Z Original” representa los valores originales de los datos LiDAR obtenidos directamente del archivo .LAS; “P_Z_MDT” representa los datos recolectados del MDT; y el campo “Diferencia” es el resultado de restar los campos anteriores. El campo más relevante en este caso es el del error medio cuadrático (EMC). El valor máximo es de 0,30 m, que está dentro de los márgenes aceptables de precisión. Calculando el error medio cuadrático global se obtuvo un valor de 0,22 m, donde se deduce que los filtros y el algoritmo de generación del MDT fueron efectivos.

TABLA XI
Resultados EMC Modelo Digital del Terreno

FID	P_Z Original	FID	P_Z MDT	Diferencia	EMC
4917	2897,27	4917,00	2897,79	0,52	0,30
4949	2897,29	4949,00	2898,15	0,85	
4981	2897,25	4981,00	2897,40	0,15	
4996	2897,46	4996,00	2897,48	0,03	
5017	2897,28	5017,00	2897,48	0,20	

FID	P_Z Original	FID	P_Z MDT	Diferencia	EMC
1000	3026,04	1000,00	3025,51	0,53	0,18
1001	3026,03	1001,00	3026,56	0,53	
1002	3026,03	1002,00	3025,30	0,73	
1003	3026,04	1003,00	3027,04	1,00	
1004	3026,05	1004,00	3025,22	0,83	

FID	P_Z Original	FID	P_Z MDT	Diferencia	EMC
8963	2660,30	8963,00	2679,81	0,49	0,28
8967	2660,41	8967,00	2661,15	0,75	
8970	2659,90	8970,00	2659,18	0,72	
8974	2660,44	8974,00	2660,57	0,13	
8976	2660,45	8976,00	2660,11	0,34	

FID	P_Z Original	FID	P_Z MDT	Diferencia	EMC
67	2238,73	67,00	2238,11	0,62	0,25
68	2237,00	68,00	2236,25	0,74	
73	2238,80	73,00	2238,85	0,05	
74	2237,23	74,00	2236,99	0,24	
82	2237,05	82,00	2237,58	0,53	

FID	P_Z Original	FID	P_Z MDT	Diferencia	EMC
7	2265,02	7,00	2264,89	0,13	0,06
8	2264,89	8,00	2265,78	0,89	
12	2264,59	12,00	2263,91	0,68	

La distribución de errores parece seguir patrones espaciales debido a la mayor o menor habilidad de los algoritmos para producir los modelos digitales.

RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN RÉGIMEN HÍDRICO

Parámetros generales.

TABLA XII
Parámetros morfométricos generales micro-cuenca de Cutilcay

Parámetros Morfométricos generales micro-cuenca del <u>Cutilcay</u>		
Descripción	Unidades	Valor
Área	km ²	4,86
Perímetro de cuenca	km	9,89
Largo de cuenca	km	3,37
Ancho de cuenca	km	1,97
Cotas		
Cota máxima	msnm	3166
Cota mínima	msnm	2272,33
Desnivel altitudinal	m	893,67
Centroide (PSC: WGS 1984, UTM, Zona 17S)		
X centroide	m	745904,54
Y centroide	m	9693847,54
Z centroide	msnm	2653,03
Altitud		
Altitud media	msnm	2653,03
Altitud más frecuente	msnm	3063,11
Altitud de frecuencia media	msnm	2820,93

El régimen hídrico resultante de la micro-cuenca, en cuanto al tamaño (área/perímetro) corresponde a una micro-cuenca pequeña. En función a su longitud axial de 3,37 km y al ancho de la micro-cuenca de 1,97km, se deduce se trata de una cuen-

ca semi-alargada. Las cotas registradas para la cuenca son: cota mínima 2272,33 msnm y cota máxima 3166 msnm, obteniendo un desnivel altitudinal de 893,67 m, presentando una altura media de 2653,03 msnm establecida a partir del MDT. El resumen de estos resultados se presenta en la Tabla XII.

Parámetros de forma

Desde el punto de vista hídrico, la forma de una cuenca influye en la escorrentía superficial de un cauce, especialmente cuando presenta precipitaciones elevadas. El factor forma en este caso es de 0,23 lo cual indica y reafirma de que se trata de una cuenca alargada (Tabla XIII). Este factor está relacionado al coeficiente de Gravelius, cuyo valor es de 1,27, que indica una cuenca de forma redonda -- ovalo redonda.

TABLA XIII

Resultados parámetros de forma micro-cuenca Cutilcay

Parámetros Morfométricos de forma micro-cuenca <u>Cutilcay</u>		
Descripción	Unidades	Valor
Forma	factor	0,23
Coefficiente de <u>Gravelius</u>	km	1,27

Parámetros de relieve

Los valores de forma, asociados a parámetros de relieve (Tabla XIV) presentan una pendiente promedio de 50,12%, de lo que se deduce que se trata de una micro-cuenca con potencial de crecidas rápidas e intempestivas. Esto conjuntamente con una pendiente media del cauce principal de 19,42% y un relieve montañoso, no permiten una evacuación rápida del caudal del agua, existiendo riesgo de inundaciones ante precipitaciones fuertes.

TABLA XIV

Resultados parámetros relieve

Parámetros Morfométricos de relieve micro-cuenca <u>Cutilcay</u>		
Descripción	Unidades	Valor
Pendiente promedio de la cuenca	%	50,12
Pendiente media del cauce	%	19,41

El análisis de la curva hipsométrica (Figura 15) es una forma de evaluar el ciclo erosivo y la etapa evolutiva en que se encuentra la cuenca. La gráfica resultante de la curva indica que se trata de una micro-cuenca joven en transición a madura (entre una etapa de equilibrio y una cuenca erosionada de valle), sujeta a procesos erosivos constantes, característico de zonas geológicamente antiguas localizadas principalmente en lugares próximos a las desembocaduras de los ríos.

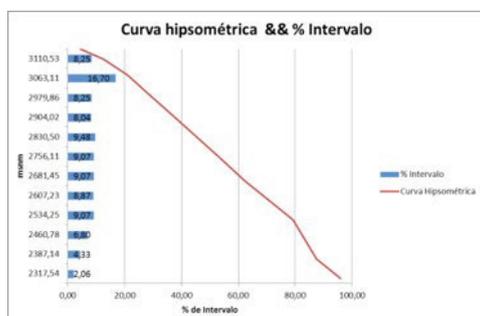


Figura 15.- Curva hipsométrica

Caracterización red hídrica

Los tiempos de concentración muy bajos en torno a 0,01 minutos, refuerzan las hipótesis anteriores e indican que la cuenca

está sujeta a fuertes procesos erosivos en los primeros tramos hídricos, pero con tendencia a la estabilización en las partes bajas (Tabla XV). Esto se puede apreciar gráficamente con la modelización del perfil longitudinal de la cuenca, la curva hipsométrica y la relación por densidad de bifurcación, que según (Strahler, 1957), los valores típicos de relación de bifurcación están entre 3 y 5 para cuencas con variaciones considerables en sus características geo-ecológicas. Índices bajos suelen relacionarse con redes fuertemente ramificadas, que repercuten directamente ante fuertes precipitaciones en ondas de crecidas rápidas.

TABLA XV

Resultados de orden hídrico según Strahler

Parámetros Morfométricos de la red hídrica micro-cuenca <u>Cutilcay</u>		
Descripción	Unidades	Valor
Longitud Cauce principal	km	4,60
Densidad del drenaje	factor	5,49
Tiempo de concentración	minutos	0,01

La red hídrica tiene un orden de 4 en la escala de niveles de Strahler/ Horton (Tablas XV, XVI), que corresponde a la mayoría de las cuencas alto andinas, deduciéndose que geomorfológicamente se trata de una cuenca relativamente joven en transición a madura, y dinámica en cuanto a sus procesos hidrológicos.

TABLA XVI

Resultado índice de bifurcación

Parámetros Morfométricos cuenca <u>Cutilcay</u>		
Orden	#	Índice Bifurcación
1	99	2,15
2	46	1,53
3	30	1,36
4	22	22

Una densidad de drenaje de 5,49 muestra que es una cuenca bien drenada, hecho directamente relacionado con la alta ramificación de la red de drenaje (Tabla XV). También está asociada con los materiales componentes de la micro-cuenca, materiales erosionables, suelos impermeables con pendientes fuertes y escasa cobertura vegetal.

Finalmente, a medida que los parámetros asociados al sistema de drenaje de la micro-cuenca son de mayor magnitud, es de esperar que el tiempo de concentración (Tabla XV) tienda a ser menor con la consiguiente mayor capacidad de producción de caudal superficial.

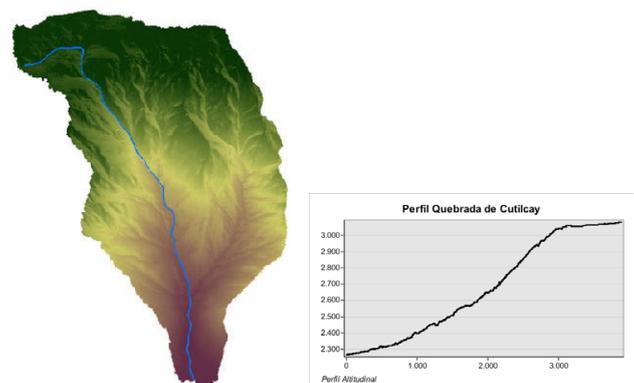


Figura 16.- Perfil y vista frontal del cauce principal

En la Figura 16, el perfil refleja gráficamente la capacidad erosiva del río en sus partes principales (superior y media), mientras que la estructura de red y orden obtenido (Figura 17), muestran una red de tipo dendrítica, con muchas ramificaciones.

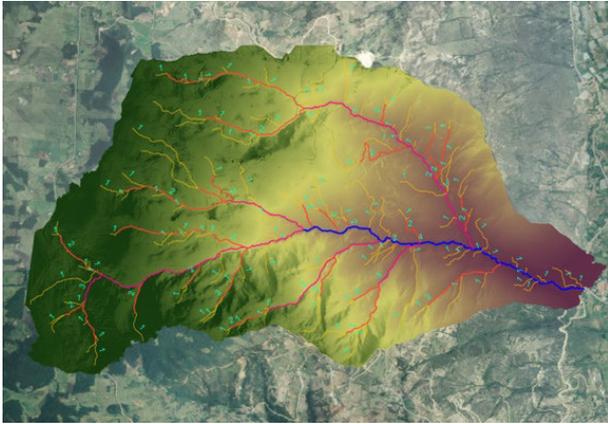


Figura 17.- Gráfica orden hídrico de la cuenca.

IV. CONCLUSIONES

La información básica del relieve de una cuenca, sub-cuenca o micro-cuenca hidrográfica, obtenida mediante metodologías analítico-descriptivas permite a quienes trabajan en proyectos relacionados con el uso de los recursos naturales el manejo integrado de cuencas; estudios sobre impacto ambiental; degradación de suelos; deforestación; conservación de los recursos hídricos etc., y contar con los insumos necesarios para el análisis y generación de los parámetros necesarios para determinar el comportamiento dentro de estas unidades hidrográficas. Estos procesos tienen un fuerte componente espacial y el empleo de los SIG es de mucha utilidad, siendo los MDT y sus derivados componentes principales para el análisis.

Destaca la importancia de contar con una descripción cuantitativa precisa de las geo-formas para realizar los análisis que permiten expresar en forma numérica las propiedades geométricas de la micro-cuenca y además de elementos que sirven de base para comprender su evolución y dinámica basal, además de evaluar su funcionamiento y tendencias en cuanto de su régimen hidrológico. En este aspecto, la tecnología LiDAR permite obtener más y mejores detalles para la representación a gran escala de la información geográfica. Sin embargo, se trata de un proceso más laborioso desde el punto de vista de procesado en gabinete y demanda recursos computacio-

nales que justifican la obtención de resultados cualitativos y cuantitativos con mayor precisión y mayor nivel de detalle.

A partir de este trabajo surge por primera vez en el área un análisis morfológico de micro-cuencas que servirá para futuros estudios hidrológicos y para planes de manejo del agua usando datos LiDAR. Los resultados se asumen más precisos que los existentes hasta el momento, aunque se requieren estudios con mayor detalle junto con una validación de campo exhaustiva. Adicionalmente, los resultados demostraron que la escorrentía sigue el comportamiento de la topografía, mientras que el análisis morfométrico advierte que es una zona compleja, con dificultades de evacuar volúmenes importantes de agua debido a su topografía. También presenta una gradiente general pronunciada, que asociada a los parámetros obtenidos, denotan un alto grado de erodabilidad.

Los parámetros generados proporcionaron información sobre la dinámica espacio temporal del caudal hídrico en la cuenca. Así, la densidad de la red de drenaje manifiesta la capacidad de entalle de los cauces fluviales y el equilibrio dinámico del sistema acorde a sus condicionantes hidrológicas, geomorfológicas y topográficas.

Las propiedades morfométricas generadas, apoyadas con datos LiDAR, aportan un marco referencial a efectos de definir la escala espacial de las investigaciones en ecología fluvial. Definiendo la cuenca hidrográfica como unidad de investigación y las propiedades morfométricas de los sistemas fluviales, como marco de referencia para un proceso de ordenación territorial, en donde la política nacional para el ordenamiento territorial, ya menciona como lineamiento principal el enfoque eco-sistémico de cuencas en el Ecuador.

El análisis geoespacial logrado con SIG, como herramienta de apoyo, constituyó un aporte esencial para ilustrar las variables que actúan a una misma escala espacial y altitudinal sobre la extensión de la red de drenaje y dinámica hídrica. Por último, la integración de los parámetros morfométricos en cuencas hidrográficas se considera un aporte significativo y relevante para la consolidación y desarrollo de planes de ordenación territorial.

Se presentará la discusión de los resultados expuestos, relacionándolos con el estado actual u otros estudios, mostrando las ventajas e inconvenientes de cada uno.

Es indispensable que en este apartado se haga referencia a los objetivos concretos y/o aportaciones, así como a su eventual aplicación. La interpretación de los resultados debe estar argumentada y mencionada con sustentos teóricos sólidos.

REFERENCIAS

- Bakula, K., Dominika, W. y Ostrowski, W. 2014. Verification and improving planimetric accuracy of airborne laser scanning data with using photogrammetric data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-3/W1: 21 - 26.
- Baltsavias, E.P. 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54 (2): 83 - 94.
- Beven, K.J. y Kirkby, M.J. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 24 (1): 43 - 69.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W. 1994. *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- Felicísimo, A.M. 1994. *Modelos Digitales del Terreno: Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Oviedo: Pentalfa.
- García Ruiz, J.M., Gómez Villar, A. y Ortigosa Izquierdo, L.M. 1987. Aspectos dinámicos de un cauce fluvial en el contexto de su cuenca: el ejemplo del río Oja. *Monografías del Instituto Pirenaico de Ecología*. Zaragoza: Consejo Superior de Investigaciones Científicas - CSIC Press.
- Gaspari, F.J., Senisterra, G.E., Delgado, M.I., Rodríguez Vagaría, A.M. y Besteiro, S.I. 2009. *Manual de manejo integral de cuencas hidrográficas*. Gaspari. La Plata: 321.
- Höhle, J. y Höhle, M. 2009. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64 (4): 398 - 406.
- Höhle, J. y Øster Pedersen, C. 2010. A new method for checking the planimetric accuracy of Digital Elevation Models data derived by Airborne Laser Scanning. En N.J. Tate y P.F. Fisher, eds., *Accuracy 2010. Proceedings of the Ninth International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*. Leicester, Uk: University of Leicester, 253 - 256.
- Höhle, J. y Potuckova, M. 2011. *Assessment of the quality of digital terrain models*. Official Publication. Amsterdam, The Netherlands: European Spatial Data Research.
- Horton, R.E. 1932. Drainage-basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, 13: 350 - 361.
- Horton, R.E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56 (3): 275 - 370.
- Jardí, M. 1985. Forma de una cuenca de drenaje. Analisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, 19: 41 - 68.
- Jones, A.F., Brewer, P.A., Johnstone, E. y Macklin, M.G. 2007. High-resolution interpretative geomorphological mapping of river valley environments using airborne LiDAR data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32 (10): 1574 - 1592.
- Kirpich, Z.P. 1940. Time of concentration for small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10 (6): 362.
- Kraus, K. y Pfeifer, N. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with Airborne Laser Scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53 (4): 193 - 203.
- Kraus, K. y Pfeifer, N. 2001. Advanced DTM generation from LiDAR data. *International Archives Of Photogrammetry Remote Sensing And Spatial Information Sciences*, 34 (3/W4): 23 - 30.
- Liu, X., Zhang, Z., Peterson, J. y Chandra, S. 2007. LiDAR-derived high quality ground control information and DEM for image orthorectification. *Geoinformatica*, 11 (1): 37 - 53.
- De Llano, F. y Mintegui Aguirre, J.A. 1986. *Hidrología de la superficie-TI*.
- Meng, X., Currit, N. y Zhao, K. 2010. Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: A review of critical issues. *Remote Sensing*, 2 (3): 833 - 860.
- Metternicht, G., Humi, L. y Gogu, R. 2005. Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment*, 98 (2): 284-303.
- Montgomery, D.R., Dietrich, W.E. y Sullivan, K. 1998. The role of GIS in watershed analysis. En S.N. Lane, K.S. Richards y J.H. Chandler, eds., *Landform Monitoring, Modelling and Analysis*. 1st (eds.). Wiley, 466.
- Moreno Brotóns, J., Alonso Sarría, F., Gomariz Castillo, F. y Alonso Bernardo, D. 2010. Análisis y validación de modelos digitales de elevaciones mediante datos LiDAR. En J. Ojeda, M.F. Pita y I. Vallejo, eds., *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Sevilla: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, 254 - 271.
- Nelson, A., Reuter, H.I. y Gessler, P. 2009. DEM production methods and sources. *Developments in Soil Science*, 33: 65 - 85.
- Patton, P.C. y Baker, V.R. 1976. Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. *Water Resources Research*, 12 (5): 941 - 952.
- Schneider, A.E. 1991. *Theoretical Geomorphology*. Berlín: Springer.
- Shapiro, S.S., Wilk, M.B. y Chen, H.J. 1968. A comparative study of various tests for normality. *Journal of the American Statistical Association*, 63 (324): 1343 - 1372.
- Splinter, D.K., Dauwalter, D.C., Marston, R.A. y Fisher, W.L. 2011. Watershed morphology of highland and mountain ecoregions in eastern Oklahoma. *Professional Geographer*, 63 (1): 131 - 143.
- Strager, M.P., Fletcher, J.J., Strager, J.M., Yuill, C.B., Eli, R.N., Todd Petty, J. y Lamont, S.J. 2010. Watershed analysis with GIS: The watershed characterization and modeling system software application. *Computers & Geosciences*, 36 (7): 970 - 976.
- Strahler, A.N. 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63 (11): 1117 - 1142.
- Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Civil Engineering*, 101: 1258 - 1262.
- Suárez, J., Ontiveros, C., Smith, S. y Snape, S. 2005. Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry. *Computers & Geosciences*, 31 (2): 253-262.

- Tarolli, P. y Dalla Fontana, G. 2007. Analysis of the headwater basins' morphology by high resolution LiDAR-derived DTM. Proceedings of the 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology. Padova, Italy, 2007: .
- Wani, S.P. y Garg, K.K. 2009. Watershed management concept and principles. Best-bet Options for Integrated Watershed Management. ICRISAT Patancheru, Andhra Pradesh, India, 2009: 1 - 11.
- Wu, J., Ma, H. y Li, Q. 2008. Least squares matching with airborne LiDAR data for strip adjustment. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37 (Part B3b): 167 - 172.
- on and Adjustment of Shifts in Daily Precipitation Data Series. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2416-2436. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2376.1>
- Zhang, X., & Srinivasan, R. (2009). GIS-Based Spatial Precipitation Estimation: A comparison of Geostatistical approaches, 45(4), 894-906.