

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN
**DELIMITACIÓN Y CODIFICACIÓN
A NIVEL 6 DE LA UNIDAD
HIDROGRÁFICA 85899
APLICANDO LA METODOLOGÍA
PFAFSTETTER CON MDE ASTER Y
ALOS PALSAR**

DELIMITATION AND CODING AT LEVEL 6 OF HYDROGRAPHIC UNIT 85899
APPLYING THE PFAFSTETTER METHODOLOGY WITH MDE ASTER AND
ALOS PALSAR

Fecha de recepción: 31/10/2022

Fecha de aceptación: 6/12/2022

Autor:

¹Vásquez Perales Nieves Soledad

¹Universidad Autónoma Juan Misael Saracho,
Doctorado en Ciencias.

Correspondencia del autor: vasquez.perales.nieves@gmail.com,
Tarija- Bolivia.

RESUMEN

La planificación para la gestión integral de recursos hídricos y recursos naturales en las cuencas de Bolivia se ha convertido en un tema muy importante para sentar las bases de la estrategia de mitigación y adaptación al cambio climático, donde la delimitación y codificación de cuencas se constituye en uno de los instrumentos de apoyo para el logro de las acciones propuestas.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo de investigación es proveer un estudio que permita apoyar a este conjunto de acciones a través de la comparación de resultados por la delimitación y codificación de unidades hidrográficas tomando como insumo de entrada a los Modelos Digitales de Elevación (MDE) ASTER y ALOS PALSAR de 30 metros aplicando la metodología desarrollada por el Ing. Otto Pfafstetter, cuya premisa principal es la asignación de códigos a las unidades de drenaje. El alcance de la investigación es la delimitación y codificación de unidades hidrográficas (cuencas) a nivel 6 comprendidas en la unidad hidrográfica de nivel 5 85899 (unidad padre) del departamento de Tarija.

El resultado obtenido por la aplicación de cada tipo de MDE es de nueve unidades hidrográficas codificadas de nivel 6, donde las unidades hidrográficas 858991, 858992, 858995, 858996, 858997, 858998 y 858999 presentan un área de tamaño similar y las unidades hidrográficas 858993 y 858994 presentan una diferencia de 63.69 Km² y 61.05 Km² respectivamente. Asimismo, en el caso del perímetro, solo la unidad hidrográfica 858993 presenta una mayor diferencia de 31.57 Km.

ABSTRACT

Planning for the integral management of water resources and natural resources in the Bolivian watersheds has become a very important issue to lay the foundations of the climate change mitigation and adaptation strategy, where the delimitation and codification of watersheds constitutes one of the support instruments for the achievement of the proposed actions.

In this context, the objective of this research work is to provide a study that allows supporting this set of actions through the comparison of results for the delimitation and coding of hydrographic units taking as input Digital Elevation Models (DEM) ASTER and ALOS PALSAR of 30 meters applying the methodology developed by Eng. Otto Pfafstetter, whose main premise is the assignment of codes to the drainage units. The scope of the investigation is the delimitation and coding of hydrographic units (watersheds) at level 6 included in the hydrographic unit of level 5 85899 (parent unit) of the department of Tarija.

The result obtained by the application of each type of DEM is nine level 6 coded hydrographic units, where the hydrographic units 858991, 858992, 858995, 858996, 858997, 858998 and 858999 present an area of similar size and the hydrographic units 858993 and 858994 present a difference of 63.69 km² and 61.05 km² respectively. Likewise, in the case of the perimeter, only the hydrographic unit 858993 presents a greater difference of 31.57 km.

Palabras Claves: Metodología Pfafstetter, delimitación y codificación, unidad hidrográfica, modelo digital de elevación.

Keywords: Pfafstetter methodology, delimitation and codification, hydrographic unit, digital elevation model.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a lo establecido en la Constitución Política del Estado (CPE), se tiene:

1.1. ARTÍCULO 375

1. Es deber del Estado desarrollar planes de uso, conservación, manejo y aprovechamiento sustentable de las cuencas hidrográficas.
2. El Estado regulará el manejo y gestión sustentable de los recursos hídricos y de las cuencas para riego, seguridad alimentaria y servicios básicos, respetando los usos y costumbres de las comunidades.
3. Es deber del Estado realizar los estudios para la identificación de aguas fósiles y su consiguiente protección, manejo y aprovechamiento sustentable.

En el Plan de Desarrollo Económico y Social 2021-2025 (PDES 2021-2025), se hace referencia que uno de los resultados de las intervenciones realizadas hasta la gestión 2025 tiene que ver con la formulación de planes directores de cuencas y planes para la gestión de la calidad de cuerpos de agua; asimismo, en el Eje 8 Medio Ambiente Sustentable y Equilibrado en Armonía con la Madre Tierra, establece como parte de la estrategia de mitigación y adaptación al cambio climático en Bolivia a la gestión integrada de recursos hídricos, donde se hace hincapié a las medidas de manejo eficiente de los recursos naturales a través de la conservación y restauración de la función de regulación de las cuencas (MPD, 2021).

Con el objetivo de dar cumplimiento a lo establecido en la CPE, el Plan Nacional de Cuencas (PNC) dependiente del Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego (VRHR) y del Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) se constituye en el encargado de la gestión integrada de los recursos hídricos y de la seguridad hídrica en el Estado Plurinacional de Bolivia, cuyo instrumento establecido para operativizar el PNC es el Programa Plurianual de Gestión Integrada de Recursos Hídricos y Manejo Integral de Cuencas (PP PNC), el cual se enmarca dentro de la Agenda Patriótica 2025 (AP 2025) (MPD, 2019) (MMAyA, 2021b).

Entidades como Global Water Partnership (GWP) y la Cooperación Alemana a través de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), mediante su proyecto de Gestión Integral con Enfoque de Cuenca PROCUENCA, realizaron recomendaciones para el fortalecimiento de la implementación de la gestión integral de recursos hídricos en el PP PNC 2021-2025, cuyo Lineamiento Estratégico 7 a la letra dice: "Establecer una plataforma de información unificada, integral y de acceso gratuito a la información hídrica ambiental de todas las fuentes existentes a nivel nacional y subnacional", poniendo de manifiesto la importancia de contar con herramientas precisas que puedan reflejar la realidad de las unidades hidrográficas del Estado Plurinacional de Bolivia (MMAyA, 2021a).

El Plan Plurinacional de Recursos Hídricos 2021-2025 (PPRH 2021-2025) es la política principal que orienta e impulsa el desarrollo de políticas sectoriales basadas en una gestión integral del agua y de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, además presenta los avances del sector en el marco del PNC. El PPRH 2021-2025 contribuye al PDES 2021-2025 (MPD, 2021) y se constituye en el Plan Sectorial de Desarrollo Integrado de Recursos Hídricos 2021-2025 (PSDI RH 2021-2025), así también, en el contexto internacional, cumple con la Agenda 2030 de los objetivos de desarrollo sostenible y a las contribuciones nacionalmente determinadas (MMAyA, 2022).

En el PPRH 2021-2025, en su apartado de estrategia de intervención territorial, combina la planificación de cuencas a nivel nacional a través de las Unidades Hidrográficas de Gestión Transfronteriza (nivel 1); las Unidades Hidrográficas de Información (niveles 2 y 3), las cuales tienen alcance interdepartamental; las Unidades Hidrográficas de Gestión (niveles 3 y 4) con alcance regional y las Unidades Hidrográficas Operativas (niveles 5 y 6) con alcance intra o intermunicipal, donde se hace énfasis a la recuperación y protección de fuentes de agua, además de la elaboración de estudios multisectoriales (MMAyA, 2022).

El Programa Nacional de Riego con Enfoque de Cuenca (PRONAREC) dependiente del MMAyA, cuyo inicio de actividades data desde el año 2010 con el denominativo PRONAREC I y actualmente se desarrolla su tercera versión como PRONAREC III, se basa en acciones preventivas complementarias a las recogidas en el PNC, cuyo principal objetivo es el de garantizar que el caudal ofertado por la microcuenca no disminuya durante la vida útil de los proyectos de riego. El PRONAREC promovió la entrega de derechos y usos del agua, dimensión de género, enfoque de cuenca y el desarrollo del Sistema Nacional de Información de Riego (SNIR) (Llavona, A., 2020). Asimismo, promovió la elaboración de mapas temáticos, entre ellos de las cuencas donde se encontraban los proyectos de riego en coordinación con los Servicios Departamentales de Riego (SEDERIs) en los departamentos del territorio nacional donde tenía cobertura.

El Gobierno Autónomo Departamental de Tarija (GADT), a través de la Secretaría de Medio Ambiente y Agua, en el Plan Departamental del Agua de Tarija Periodo 2013-2025, Componente: Agua para la Naturaleza, Eje temático: Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH), Objetivo estratégico: Ordenar el aprovechamiento de los recursos hídricos en armonía con la naturaleza. Programa: Gestión Integral de los Recursos Hídricos y Manejo Integral de Cuencas, indica que se pretende articular acciones de los usuarios del agua desde la perspectiva de una adecuada intervención de cuencas de manera que permita conservar, regular, proteger y mantener las condiciones naturales de las cuencas a través del aprovechamiento de los recursos hídricos con fines productivos en el marco del PNC (GADT, 2013).

Según el MMAyA: "La gestión de los recursos naturales en general y de los recursos hídricos en particular considera a la cuenca como el espacio territorial más adecuado. Las unidades hidrográficas están definidas por fronteras naturales las cuales no toman en consideración las divisiones políticas entre países ni al interior de un país." (MMAyA, 2010a).

Según la Comunidad Andina, define a la cuenca hidrográfica como "el territorio en el cual caen, se depositan y discurren las aguas a través de una red de cauces que convergen en uno principal y que, en forma superficial o subterránea, confluyen a un mismo lugar, según el caso, a un mar. En la actualidad la definición de cuencas hidrográficas ha evolucionado y se considera a la cuenca como un sistema, que puede definirse como un conjunto de objetos que interaccionan de manera regular e interdependiente." (CAN, 2008).

En este contexto, se tiene evidencia que en Bolivia ya se realizaron trabajos previos de delimitación y codificación de unidades hidrográficas, siendo los pioneros el Instituto Geográfico Militar (IGM) y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SE-NAMHI), generando así en el año 1990 los límites de las tres grandes unidades hidrográficas que cubren el territorio boliviano: Amazonas, Río de La Plata y Cerrada (MMAyA, 2010a).

Sin embargo, fue en el año 2008, cuando el Ex Viceministerio de Cuencas y Recursos Hídricos elaboró un mapa preliminar de unidades hidrográficas de nivel 5 aplicando la metodología Pfafstetter, generando así hasta el año 2010 varios documentos, entre guías y manuales de procedimientos para la delimitación de unidades hidrográficas de Bolivia.

La metodología Pfafstetter fue desarrollada en la República Federativa de Brasil en el año 1989 por el Ing. Otto Pfafstetter. A partir del año 1997, United States Geological Survey (UGS - Servicio Geológico de los Estados Unidos de América) lo reconoce como estándar internacional. El objetivo de esta metodología, es el de asignar un código único a las unidades de drenaje basada en la topología de la superficie del terreno (CAN, 2008).

Para la aplicación de esta metodología, es importante contar con insumos tales como los Modelos Digitales de Elevación (MDE), además de contar con capas geográficas base del territorio nacional, donde GeoBolivia es el espacio digital para este propósito. GeoBolivia es una iniciativa de la Vicepresidencia del Estado Plurinacional de Bolivia, donde a través

de su portal web, es posible descargar información geográfica de interés, constituyéndose así en el vínculo entre instituciones que forman una red cuyo fin es el de compartir sin costo alguno la información de Bolivia (GeoBolivia, 2022).

Por todo lo expuesto, la delimitación y codificación de unidades hidrográficas se constituye en un instrumento importante para su aplicación en diferentes ámbitos, principalmente a los relacionados al manejo de recursos hídricos y manejo integral de cuencas como parte de las estrategias para la mitigación y adaptación al cambio climático.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se enmarca en el método inductivo-deductivo, porque por una parte se realiza generalizaciones a partir de una serie de pasos establecidos en la metodología Pfafstetter para la delimitación y codificación de unidades hidrográficas que se inician con el procesamiento de los MDE del área de estudio con el apoyo de software especializado; por otra parte, se toma también en cuenta las conclusiones generales para poder obtener explicaciones particulares.

El enfoque de investigación es mixto, debido a que se investiga sobre la realidad de un acontecimiento, que en este caso lo representa la información geográfica como insumo para la determinación de unidades hidrográficas, cuyo resultado –por la incorporación de dos tipos de MDE– permite la interpretación y el análisis crítico correspondiente.

El alcance es de tipo explicativo, debido a que se da respuesta a los resultados aplicando dos tipos de MDE en la delimitación y codificación de unidades hidrográficas a través de la metodología Pfafstetter.

El diseño es de tipo no experimental transeccional correlacional, dado que los insumos que son parte del estudio se procesan en su contexto natural sin alterar la información base y se establece la relación causal en los resultados obtenidos por uno u otro MDE utilizado en el trabajo de investigación.

Con respecto a los materiales, los MDE utilizados son: ASTER (versión 3) y ALOS PALSAR, ambos con una resolución espacial de 1 arco de segundo (apro-

ximadamente 30 metros). El MDE ASTER (The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) es un esfuerzo entre el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) y la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA), cuyo objetivo radica en poder entender los procesos, tanto a escala local como regional sobre lo que ocurre en la superficie de la tierra y la atmósfera interior (Vargas, C., s.f.). El MDE ALOS PALSAR, se constituye en las imágenes de radar del satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite) de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) (GeoSpatial, 2022).

En este contexto, los MDE que cubren la zona de estudio (unidad hidrográfica 85899) corresponden a:

- ◉ **MDE ASTER:** ASTGTMV003_S22W065_dem.tif (ASTER GDEM, 2022)
- ◉ **MDE ALOS PALSAR:** AP_24375_FBD_F6740_RT2_dem.tif y AP_24127_FBD_F6750_RT2_dem.tif (ASF, 2022)

GeoBolivia tiene a disposición un catálogo avanzado de ficheros de metadatos de la información geográfica de Bolivia, de donde se obtuvieron los mapas base de las unidades hidrográficas de nivel 5, límites de departamento, entre otras capas geográficas (WGS84 - World Geodetic System 1984, zona 20) (GeoBolivia, 2022).

Para la representación de la información geográfica de la zona de estudio, se utiliza la herramienta ArcMap 10.8 de ArcGIS, la cual permite esta representación como una colección de capas, como así también el procesamiento de cada uno de los pasos que especifica la metodología Pfafstetter (ESRI, s.f.).

Se aplica el Manual de Procedimientos de Delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas (MMAyA, 2010b), el cual incluye la metodología Pfafstetter que comprende una serie de procedimientos técnicos para la delimitación y asignación de códigos únicos a las unidades hidrográficas, cuyos pasos son los siguientes:

3. PROCESO SEMIAUTOMÁTICO PARA LA DELIMITACIÓN DE UNIDADES HIDROGRÁFICAS

3.1. GENERACIÓN DE ÁREAS DE DRENAJE

3.1.1. MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT) Y MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (MDE)

Según Bosque et al. (1990), citado por (Franquet, J. y Querol, A., 2010), concluye que "un modelo digital del terreno (MDT) es la representación simplificada, en un formato accesible a los ordenadores, de la topografía del terreno (las alturas sobre el nivel medio del mar). [...] Aunque un modelo digital del terreno representa, habitualmente, la topografía del terreno, en realidad cualquier hecho que cumpla unas mínimas características, esencialmente la continuidad espacial de la variación, puede ser representado mediante este planteamiento: las precipitaciones, las temperaturas, la composición litológica o mineral, la acidez o basicidad de los suelos, etc."

Según Felicísimo, A. (1994), citado por Cuarteto, A. (2003), concluye que "un modelo digital de elevaciones es una estructura de datos numérica que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. Un terreno real puede describirse de forma genérica como una función bivariable continua, donde representa la altitud del terreno en el punto de coordenadas y es una función que relaciona la variable con su localización geográfica. En un modelo digital de elevaciones, la función anterior se aplica sobre un dominio espacial concreto, . En consecuencia, un MDE puede describirse genéricamente como ."

Entonces, un MDE es un MDT donde los datos que almacena representan valores de altitud, el cual permite delimitar las unidades hidrográficas.

3.1.2. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN OPTIMIZADO

Se aplica la corrección a través del rellenado de posibles vacíos en los MDE ASTER y ALOS PALSAR de la unidad hidrográfica 85899 a través de la herra-

mienta Fill de ArcMap.

3.1.3. DIRECCIÓN DE FLUJO

La dirección de flujo se calcula con la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{Cambio de valor de } z}{\text{distancia}} * 100$$

Formula 1

Asimismo, se considera la dirección más empinada de cada celda del MDE, donde los valores de salida pueden ser: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 y 128. La Figura 1 muestra la distribución de estas salidas.

32	64	128
16		1
8	4	2

Figura 1. Valores de salida de la dirección de flujo calculado
Fuente: Adaptado de (MMAyA, 2010b)

Entonces, si la dirección de descenso más empinado se encuentra a la derecha de la celda, la dirección de flujo es codificada con el valor 1.

Por otra parte, en caso de presentarse valores iguales en la dirección de descenso en todas las celdas adyacentes, se amplía la vecindad hasta encontrar el descenso más empinado. Este procedimiento se realiza con la función Flow Direction de ArcMap tomando como entrada a los MDE de la unidad hidrográfica 85899 optimizada.

3.1.4. ACUMULACIÓN DE FLUJO

La acumulación de flujo tiene como resultado una matriz, donde cada celda contiene un valor de acumulación de peso que proviene de todas las demás celdas que tiene dirección hacia esta. Cabe señalar, que las celdas cuyo valor es 0, dan cuenta que se trata de puntos topográficos altos, determinando así los picos o cordilleras.

3.1.5. ACUMULACIÓN DE FLUJO RECLASIFICADA

Con el fin de identificar la red hídrica donde se visualice claramente cuatro unidades de drenaje tipo

cuenca y cinco unidades de drenaje tipo intercuenca, se determina el flujo de acumulación adecuado para poder obtener estos parámetros a través del cálculo del umbral de acumulación de flujo para la obtención de los tributarios necesarios.

Se aplica la función Reclassify de ArcMap para la reclasificación de la acumulación de flujo y la función Raster Calculator para el establecimiento del cálculo del umbral.

3.1.6. RED DE DRENAJE

Se asigna valores únicos a las secciones de la red de drenaje lineal principal. Tomando en cuenta como entrada a la acumulación de flujo reclasificada de la cuenca 85899 se aplica la función Stream Link de ArcMap.

3.1.7. GENERACIÓN DE CUENCAS

En este paso se determina el área de contribución, el cual se encuentra por encima del conjunto de celdas de una matriz. Por lo tanto, una cuenca es el área donde el agua que se encuentra drenando se ubica en un colector principal. Se aplica la función Watershed de ArcMap para la determinación de nueve unidades hidrográficas.

3.1.8. GENERACIÓN VECTORIAL DE UNIDADES HIDROGRÁFICAS

Consiste en la conversión de las unidades hidrográficas obtenidas al formato vectorial de tipo polígono.

En algunos casos, es necesario otras conversiones más como: formato lineal y reconversión a polígono en función a la complejidad o cantidad de unidades hidrográficas que se requiera delimitar. Este proceso se realiza con el fin de que posteriormente se pueda realizar el proceso de llenado de datos como el código Pfafstetter, área o superficie, perímetro, entre otros en la tabla asociada de la capa generada.

Se aplica la función Raster to Polygon de ArcMap donde se obtiene el resultado correspondiente a las unidades hidrográficas comprendidas en la cuenca 85899 en formato vectorial.

4. CODIFICACIÓN DE UNIDADES HIDROGRÁFICAS

Para la codificación de acuerdo a la metodología Pfafstetter, se determina el curso del principal río de la unidad hidrográfica objeto de estudio, donde se identifica además las cuatro unidades tipo cuenca con mayor área que confluyen al río principal desde la desembocadura hacia donde nace este, los cuales son codificados con los valores: 2, 4, 6 y 8; en cambio, se codifica con los valores: 1, 3, 5, 7 y 9 a las unidades tipo intercuenca o entrecuenca desde aguas abajo hacia arriba iniciando en la desembocadura. La cuenca interna se codifica con el valor 0. La Figura 2 muestra de manera gráfica la lógica de codificación.

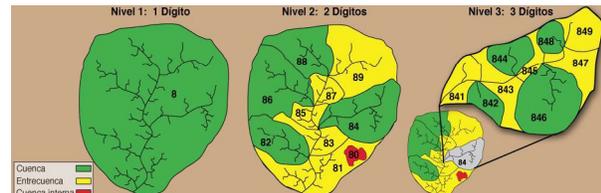


Figura 2. Lógica de codificación de acuerdo a la metodología Pfafstetter
 Fuente: (Ponce, V., s.f.)

5. RESULTADOS

Se identificó geográficamente el área de estudio. La Figura 3 muestra la ubicación geográfica de la unidad hidrográfica objeto de estudio de nivel 5 con código 85899 en el departamento de Tarija.

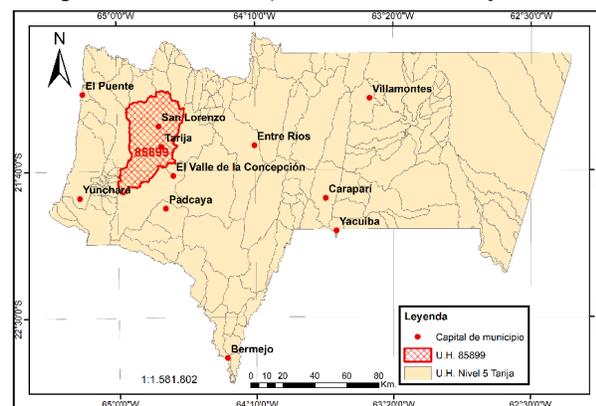


Figura 3. Ubicación geográfica de la unidad hidrográfica 85899 en el departamento de Tarija
 Fuente: Elaboración propia

Como producto de la aplicación de la metodología Pfafstetter, a continuación, se muestran los princi-

pales resultados obtenidos por los pasos realizados en el marco del Manual de Procedimientos de Delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas (MMAyA, 2010b).

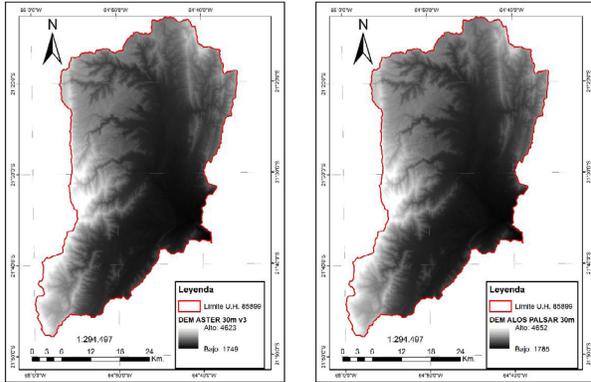


Figura 4. Modelo Digital de Elevación U.H. 85899

a) MDE ASTER 30m b) MDE ALOS PALSAR 30m

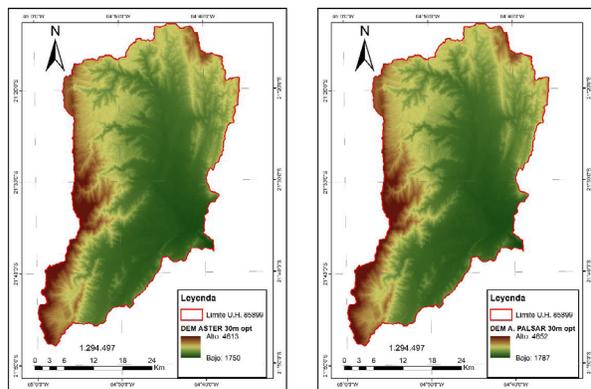


Figura 5. Modelo Digital de Elevación optimizado U.H. 85899

Fuente: Elaboración propia

a) R. MDE ASTER 30m b) R. MDE ALOS PALSAR 30m

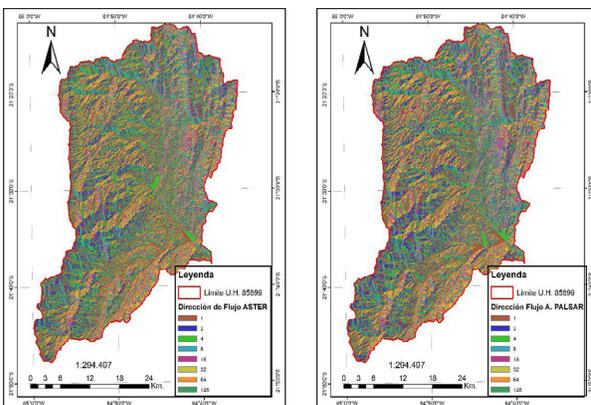


Figura 6. Dirección de flujo U.H. 85899

Fuente: Elaboración propia

a) R. MDE ASTER 30m b) R. MDE ALOS PALSAR 30m

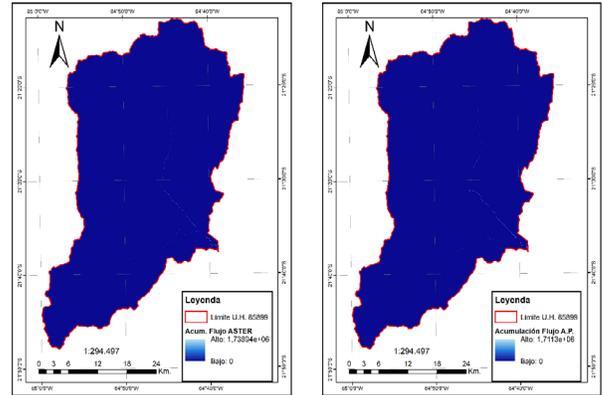


Figura 7. Acumulación de flujo U.H. 85899
Fuente: Elaboración propia

a) R. MDE ASTER 30m b) R. MDE ALOS PALSAR 30m

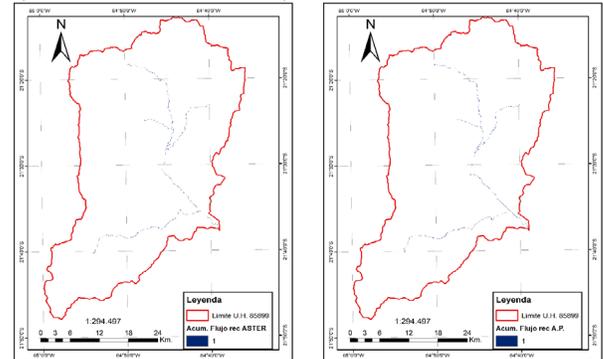


Figura 8. Acumulación de flujo reclasificado U.H. 85899
Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos hasta ahora, se constituyen en las entradas para la obtención de resultados de la red de drenaje, generación de unidades hidrográficas y su posterior conversión a formato vectorial (polígono).

Entonces, considerando que se parte de la unidad hidrográfica 85899 (padre) que corresponde al nivel 5, se codifica cada una de las unidades hidrográficas de nivel 6, añadiendo al final del código padre el dígito que corresponde según la metodología Pfafstetter.

La Figura 9 muestra el resultado de la codificación de las unidades hidrográficas de nivel 6 que comprenden la unidad hidrográfica 85899, producto de la actualización del campo relacionado al código de la tabla relacionada a la capa de unidades hidrográficas de tipo polígono. Asimismo, se observa que el río Guadalquivir es el río principal de la red de drenaje.

a) R. MDE ASTER 30m b) R. MDE ALOS PALSAR 30m

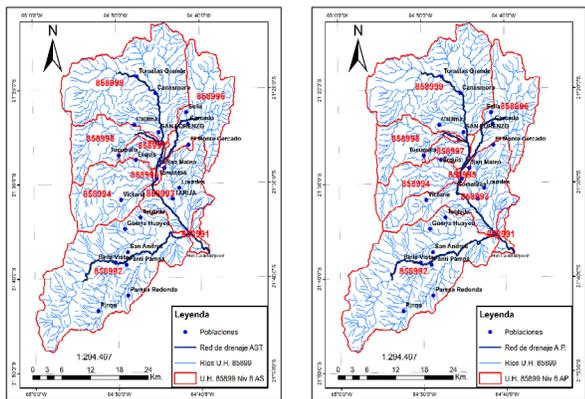


Figura 9: Codificación de unidades hidrográficas de nivel 6 U.H. 85899 Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se tiene como resultado final, una tabla de resumen que incluye las principales características de cada una de las unidades hidrográficas generadas comprendidas en la unidad hidrográfica padre 85899 tomando como insumo a los MDE ASTER 30m y ALOS PALSAR 30m.

Unidad hidrográfica de nivel 5	Unidad hidrográfica de nivel 6	Tipo	MDE ASTER 30m		MDE ALOS PALSAR 30m	
			Área (km ²)	Perímetro (km)	Área (km ²)	Perímetro (km)
			858991	Intercuenca	20.01	28.93
858992	Cuenca	463.86	115.17	464.09	113.32	
858993	Intercuenca	152.03	69.32	215.72	100.89	
858994	Cuenca	167.52	60.31	106.47	55.68	
858995	Intercuenca	6.16	12.82	5.75	12.26	
858996	Cuenca	184.61	97.11	183.15	92.81	
858997	Intercuenca	36.91	32.90	39.78	34.81	
858998	Cuenca	116.82	67.08	111.36	63.72	
858999	Intercuenca	391.79	103.01	394.90	98.73	

Tabla 1. Relación de resultados obtenidos por la aplicación de los MDE ASTER y ALOS PALSAR Fuente: Elaboración propia

De la anterior tabla, por el resultado del cálculo de área, la unidad hidrográfica 858992 es la de mayor tamaño, representando el 30.13% de la unidad hidrográfica

85899 tanto para el resultado obtenido aplicando el MDE ASTER y el MDE ALOS PALSAR, y la unidad hidrográfica 858995 es la de menor tamaño, representando el 0.40% aplicando el MDE ASTER y 0.37% aplicando el MDE ALOS PALSAR.

Por otra parte, con respecto al cálculo de perímetro, aplicando el MDE ASTER y MDE ALOS PALSAR, la unidad hidrográfica 858992 es la de mayor tamaño con 115.17 Km y 113.32 Km respectivamente, y la unidad hidrográfica 858995 es la de menor tamaño con 12.82 Km y 12.26 Km respectivamente.

La Figura 10 muestra el gráfico de barras que relaciona el área calculada de cada una de las unidades hidrográficas de nivel 6 aplicando los MDE ASTER y ALOS PALSAR. Asimismo, se observa un cálculo de área con una baja diferencia de Km² en las unidades hidrográficas 858991, 858992, 858995, 858996, 858997, 858998 y 858999; sin embargo, las unidades hidrográficas 858993 y 858994 presentan una diferencia mayor en el tamaño del área con 63.69 Km² y 61.05 Km².

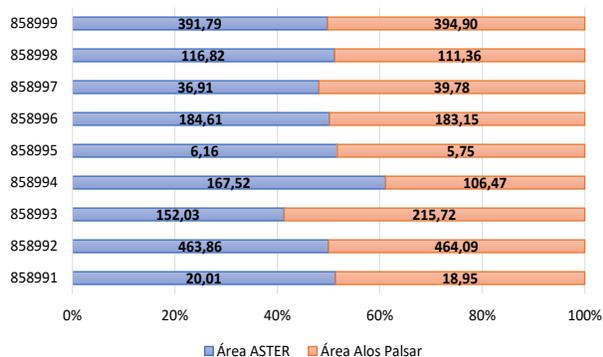


Figura 10. Relación de áreas en Km² de unidades hidrográficas de nivel 6 obtenidas Fuente: Elaboración propia

La Figura 11 muestra el gráfico de barras que relaciona el perímetro calculado de cada una de las unidades hidrográficas de nivel 6 aplicando los MDE ASTER y ALOS PALSAR. Asimismo, se observa un cálculo de perímetro con una baja diferencia de Km en las unidades hidrográficas 858991, 858992, 858994, 858995, 858996, 858997, 858998 y 858999; sin embargo, la unidad hidrográfica 858993 presenta una alta diferencia en el perímetro con 31.57 Km.

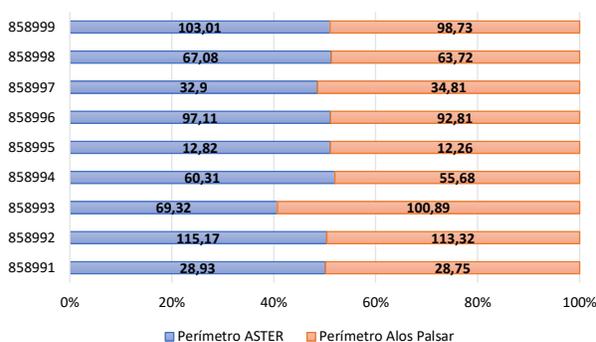


Figura 11. Relación de perímetros en Km de unidades hidrográficas de nivel 6
Fuente: Elaboración propia

6. DISCUSIÓN

Uno de los insumos considerados para la delimitación y codificación de unidades hidrográficas a través de la metodología Pfafstetter lo constituyen los MDE, que en la presente investigación comprenden dos tipos: MDE ASTER y MDE ALOS PALSAR; además, con el fin de poder comparar los resultados, ambos MDE son de 1 arco de segundo (aproximadamente 30 metros). El resultado obtenido por cada tipo de MDE a partir de la unidad hidrográfica de nivel 5 85899 es de nueve unidades hidrográficas de nivel 6. Para el caso del cálculo de área de las unidades hidrográficas, siete presentan similar tamaño y dos presentan mayor diferencia en el resultado obtenido. Para el caso del cálculo del perímetro, ocho presentan similar tamaño y una presenta mayor diferencia.

En este contexto, la elección de uno u otro tipo de MDE puede incidir en el resultado final de delimitación de unidades hidrográficas, para lo cual, se deberá abordar la incorporación de otros elementos de análisis, como trabajo in situ en caso de que la diferencia sea realmente considerable y que pueda afectar a la toma de decisiones, caso contrario, se debe establecer la diferencia mínima aceptada para la elección de uno u otro resultado.

Por otra parte, la delimitación óptima de las unidades hidrográficas aplicando la metodología Pfafstetter está condicionada a la determinación del umbral de acumulación de flujo adecuado para la obtención de los tributarios necesarios. Asimismo,

es pertinente realizar delimitaciones de unidades hidrográficas a partir de MDE con resoluciones más altas, por ejemplo, los MDE ALOS PALSAR con 12.5 metros.

Contar con unidades hidrográficas delimitadas y codificadas con niveles superiores al nivel 5, permitirá tener una mejor visualización del área de trabajo que teniendo unidades hidrográficas más extensas; para ello, dependerá del objetivo que se tiene para la obtención de más niveles de unidades hidrográficas, de manera que este proceso se constituya en un instrumento de apoyo en las acciones de intervención en el marco de la planificación para la gestión integral de recursos hídricos y recursos naturales en las cuencas de Bolivia.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 📖 ASTER Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM). (2022). ASTER. [Repositorio MDE en línea]. Fecha de consulta: 25 de septiembre de 2022. Disponible en: https://gdemdl.aster.jp/acesystems.or.jp/index_en.html
- 📖 ASF Data Search Vertex (ASF). (2022). ALOS PALSAR. [Repositorio MDE en línea]. Fecha de consulta: 25 de septiembre de 2022. Disponible en: <https://search.asf.alaska.edu/#/>
- 📖 Comunidad Andina - CAN. (2008). Delimitación y Codificación de las Cuencas Hidrográficas en la CAN [Documentos de trabajo en línea]. Novena Reunión de Expertos Gubernamentales en Estadísticas Ambientales de la Comunidad Andina. Fecha de consulta: 22 agosto 2022. Disponible en: http://intranet.comunidadandina.org/Documentos/Reuniones/DTrabajo/SG_REG_EMAB_IX_dt%203.pdf
- 📖 Cuarteto, A. (2003). Análisis de Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) generados con imágenes SPOT-HRV y TERRA ASTER. [Tesis Doctoral en línea]. Universidad de Extremadura, Cáceres – España. Fecha de consulta: 10 de octubre de 2022. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=18495>

- ESRI. (s.f.). Qué es ArcMap. [En línea]. Fecha de consulta: 12 de septiembre de 2022. Disponible en: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/main/map/what-is-arcmap-.htm>
- Estado Plurinacional de Bolivia. Constitución Política del Estado, de 7 de febrero de 2009. Art. 375.
- Franquet, J., y Querol, A. (2010). Nivelación de Terrenos por Regresión Tridimensional. Una Aplicación de los Métodos Estadísticos. [Libro en línea]. UNED-Tortosa. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Fecha de consulta: 12 de enero de 2022. Disponible en: <https://www.eumed.net/libros-gratis/2011b/967/modelo%20digital%20del%20terreno.html>
- GeoBolivia. (2022). Infraestructura de Datos Espaciales del Estado Plurinacional de Bolivia [Repositorio en línea]. Fecha de consulta: 20 de agosto de 2022. Disponible en: <http://geo.gob.bo/portal/>
- GeoSpatial. (2022). Imágenes de Satélite. [En línea]. Fecha de consulta: 5 de septiembre de 2022. Disponible en: <https://www.geospatial.com.co/imagenes-de-satelite/alos-palsar.html>
- Gobierno Autónomo Departamental de Tarija – GADT. (2013). Plan Departamental del Agua de Tarija 2013-2025 "Agua para Todos y para Siempre". [En línea]. Fecha de consulta: 19 agosto de 2022. Disponible en: http://servicios.ucb-tja.edu.bo:8090/sihita/css/docs/PLN-00023/PLN-00023_DOC.pdf
- Llavona, A. (2020). Recursos Naturales y Desarrollo: Lecciones del Estado Plurinacional de Bolivia para la Adopción del Enfoque del Nexo. [Libro en línea]. Naciones Unidas. Fecha de consulta: 17 agosto de 2022. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46546/1/S2000845_es.pdf
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA). (2010). Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego. Delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas de Bolivia. La Paz, Bolivia.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua – MMAyA. (2010). Manual de Procedimientos de Delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas. Ministerio de Medio Ambiente y Agua, Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego. La Paz – Bolivia.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua – MMAyA. (2021). Informe Técnico: Recomendaciones de Lineamientos Estratégicos para la Implementación de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos en el marco del Programa Plurianual del Plan Nacional de Cuencas 2021-2025. [En línea]. Fecha de consulta: 19 de agosto de 2022. Disponible en: https://www.bivica.org/files/5830_Informe%20T%C3%A9cnico%20ODS6.5.1_PRO-CUENCA%20Ariil_2021.pdf
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua – MMAyA. (2021). Plan Sectorial de Desarrollo Integrado de Recursos Hídricos 2021 – 2025. [En línea]. Fecha de consulta: 21 de agosto de 2022. Disponible en: <https://www.mmaya.gob.bo/transparencia/planificacion/plan-sectorial-de-desarrollo-integral-psdi-y-seguimiento/>
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua – MMAyA. (2022). Plan Plurinacional de Recursos Hídricos 2021 – 2025. [En línea]. Fecha de consulta: 31 de octubre de 2022. Disponible en: https://nube.mmaya.gob.bo/index.php/s/nR3Sd4jPfqLNT-cY?fbclid=IwAR35U7NgqMz3EmbTDWsnPVYdz-q8F2HTEf1QDyvrX1xgLhqNFWHVWow__Os
- Ministerio de Planificación del Desarrollo – MPD. (2019). Agenda Patriótica 2025. [En línea]. Fecha de consulta: 18 agosto de 2022. Disponible en: http://www.planificacion.gob.bo/uploads/AGENDA_PATRIOTICA2025_MPD.pdf

- 🔖 Ministerio de Planificación del Desarrollo – MPD. (2021). Plan de Desarrollo Económico y Social 2021-2025. [En línea]. Fecha de consulta: 20 de agosto de 2022. Disponible en: Disponible en: http://www.planificacion.gob.bo/uploads/PDES_2021-2025a.pdf
- 🔖 Ponce, V. (s.f.). El Sistema de Codificación Pfafstetter para la Identificación de Cuencas Hidrográficas. [En línea]. Fecha de consulta: 15 de octubre de 2022. Disponible en: http://ponce.sdsu.edu/pfafstetter_sistema_presentacion.html
- 🔖 Vargas, C. (s.f.). Imágenes ASTER. Remote Sensing Geoimage SAC. Procesamiento de Imágenes de Satélite & GIS. [En línea]. Fecha de consulta: 30 de agosto de 2022. Disponible en: <https://www.geosoluciones.cl/documentos/aster/IMAGENES-ASTER.pdf>