



ELABORACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRAL DE CODIFICACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE ELEMENTOS HIDROLÓGICOS (SICAEH)

José Carlos Robredo Sánchez ⁽¹⁾; Susana Chalabe ⁽²⁾; Carlos de Gonzalo Aranoa ⁽¹⁾;
Pablo Huelin Rueda ⁽¹⁾; Juan Ángel Mintegui Aguirre ⁽¹⁾ & Enrique Tarifa ⁽³⁾

¹⁾Unidad de Hidráulica e Hidrología, Departamento de Ingeniería Forestal, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid (España) ⁽²⁾Unidad de Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas UGICH, Universidad Nacional de Jujuy, San Salvador de Jujuy. (Argentina) ⁽³⁾Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy, San Salvador de Jujuy. (Argentina)

Ciudad Universitaria s/n, 28040 Madrid (España), Teléfono +34 91 3367118
E-mail: josecarlos.robredo@upm.es - Web: <http://www.montes.upm.es>

RESUMEN

Este documento describe la elaboración de una metodología de codificación integral de elementos hidrológicos que permita crear una base de información hidrológica para la Provincia de Jujuy, fácilmente actualizable y ampliable. Esta metodología pretende, por un lado, tener el carácter universal que permita situar a la estructura hidrológica de Jujuy en su contexto a nivel regional, continental e incluso mundial y, por otro, ser fácilmente aplicable a otros territorios. La metodología distingue los siguientes elementos: puntos de control de flujo, líneas de control de flujo, tramos de río, áreas inundables por tramos, divisorias de aguas y cuencas vertientes. La codificación se apoya en dos tipos de información: las coordenadas geográficas respecto al elipsoide WGS84 en su formato decimal y una codificación hidrológica de los ríos, que hay que realizar previamente, para la cual se ha utilizado el procedimiento de Pfafstetter (1989) modificado para la ocasión. La metodología se ha aplicado a la Provincia de Jujuy en concreto, pero ha requerido de una aplicación previa menos detallada a la cuenca del río Paraná con la finalidad de definir la codificación hidrológica de los ríos de dicha provincia, cuyas cuencas se integran en el territorio que drena por la citada gran cuenca.

Palabras clave: elementos hidrológicos; coordenadas geográficas; cuencas hidrográficas de Jujuy.

ABSTRACT

This document describes the preparation of a methodology of integral codification of hydrologic elements, which allows creating an easy-to-update and expandable hydrologic data for the Jujuy Province. This methodology tries; on the one hand, to reach the universal character that permits to locate the hydrologic structure of Jujuy within its regional or even its world context. On the other hand, it tries to be easily applicable to other territories. The methodology distinguishes the following elements: flow control points, flow control lines, river stretches, floodable areas in stretches, watershed lines and catchments. The codification rests on two types of information: geographic coordinates respect WGS84 ellipsoid in decimal format and a hydrologic codification to be made previously, which is a modification of Pfafstetter procedure (1989). The methodology has been applied to the catchments of the Jujuy Province, being necessary a previous less detailed application to the catchment where they drains, the Paraná River.

Keywords: hydrologic elements; geographic coordinate; catchments of Jujuy.

INTRODUCCIÓN.

En el marco de la Acción Integrada (AI) entre la Universidad Politécnica de Madrid y la Universidad Nacional de Jujuy titulada: *Implementación de una unidad de estudio, monitorización y control de cuencas hidrográficas, con la finalidad de apoyar la toma de decisiones en la gestión a medio y largo plazo en la Provincia de Jujuy (Argentina)*, financiada por la AECID, se planificaron (2008) y se vienen desarrollando (2009-11) tres grupos de actuaciones: 1) De formación sobre la ordenación y restauración de cuencas vertientes. 2) De investigación aplicada y asesoramiento en las mismas cuestiones a los organismos de la Provincia con competencias sobre las cuencas vertientes. 3) De colaboración e integración de todos los entes de la Provincia que participan en la AI, para desarrollarla en sus aspectos hidráulicos, hidrológicos, geo-torrenciales y de ciencias y técnicas auxiliares (cartográficas, informáticas, etc.), que puedan ayudar a mejorar actividades específicas de cada uno de los organismos participantes.

Las actuaciones del grupo 2 incluyen las tareas: *a)* la monitorización hidro-meteorológica de las cuencas vertientes de la Provincia de Jujuy, *b)* la elaboración de una cartografía básica orientada a la ordenación territorial de la Provincia desde un punto de vista hidrológico y *c)* el desarrollo de utilidades para la gestión hidráulica e hidrológica de cuencas. Esta comunicación aborda un aspecto concreto del epígrafe *b)* y se justifica por el propósito de la AI que a continuación se comenta.

Para analizar el comportamiento hidrológico y la problemática geo-torrencial de las cuencas vertientes de la Provincia de Jujuy, es imprescindible definir previamente la estructura hidrográfica de las mismas; tarea que se decidió comenzar estudiando la cuenca de la Quebrada de Humahuaca. Para ello se partió de la elaboración de una cartografía básica y la recopilación de la información existente. Para la primera se aprovechó la información digital de elevación del terreno a nivel mundial del proyecto SRTM puesta en Internet por la NASA y de libre disposición. A partir de ella se generó un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), que se corrigió para la Provincia de Jujuy, mediante la información de la Red Geodésica disponible en la Dirección Provincial de Inmuebles de la Provincia de Jujuy y en el Instituto Geográfico Nacional de Argentina, proporcionando un mapa de curvas de nivel con equidistancia de 25 m. Para la segunda, se recopiló la información hidrológica facilitada por los Servicios correspondientes de la Provincia de Jujuy. Todo ello permitió realizar una subdivisión y codificación hidrográfica de la cuenca de la Quebrada; estableciendo una relación de puntos de control sobre su red de drenaje, atendiendo a los cuales se digitalizaron las correspondientes divisorias de aguas.

La extensión de dicho esquema a todas las cuencas de la Provincia de Jujuy, planificada en la AI; exige una codificación hidrográfica de la red de cauces naturales de la Provincia. Con este fin se planteó realizar una división previa en unidades hidrológicas, que fuera progresiva y respondiera a unos criterios generales; por lo que se decidió partir de una división de cuencas hidrográficas existente, realizada por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación a nivel nacional. De dicha división se han analizado las cuencas que en algún punto ocupan el territorio de la Provincia de Jujuy y sobre sus límites se ha efectuado un análisis detallado para delimitar sus divisorias, con la precisión que permite la cartografía básica elaborada a través de la AI.

Retornando al contenido específico de este documento, es decir, centrándose estrictamente en el epígrafe *b)* de la actuación 2 correspondiente a la citada AI, se inicia asumiendo que la delimitación hidrológica es una cuestión básica en cualquier estudio que analice el movimiento del agua sobre la superficie terrestre. Esta delimitación puede ser más o menos precisa, dependiendo del nivel de detalle al que se quiera llegar (por lógica, cuanto mayor detalle se le quiere imprimir a la delimitación de una cuenca hidrográfica en el territorio, mayor debe ser el número de puntos que deben establecerse para conseguirlo); pero en todo caso cuando se trata de hidrología de superficie se apoya en dos principios básicos generales: 1) El agua se va concentrando en una red lineal de cauces que son confluentes y sobre los que circula siguiendo un único sentido hacia cotas más bajas; 2) La cuenca vertiente o hidrográfica, referente a un punto de una red de drenaje, es aquella superficie del territorio que vierte sus aguas a dicha red, aguas arriba del punto de referencia definido sobre la misma.

En realidad, dicho punto de referencia es la sección transversal ocupada por el flujo, es decir, una línea. En la mayoría de los casos esta línea es prácticamente despreciable frente a la longitud de la divisoria total de la cuenca vertiente (Figura 1.a), pero en ocasiones puede tener dimensiones importantes si queremos delimitar un área vertiente directa a una gran masa de agua (Figura 1.b). En estos casos la salida del agua se realiza por múltiples puntos, entendiéndose que dicha cuenca vertiente sería la suma de todas las cuencas vertientes a los puntos de corte de la mencionada línea con la red de drenaje del territorio en cuestión.

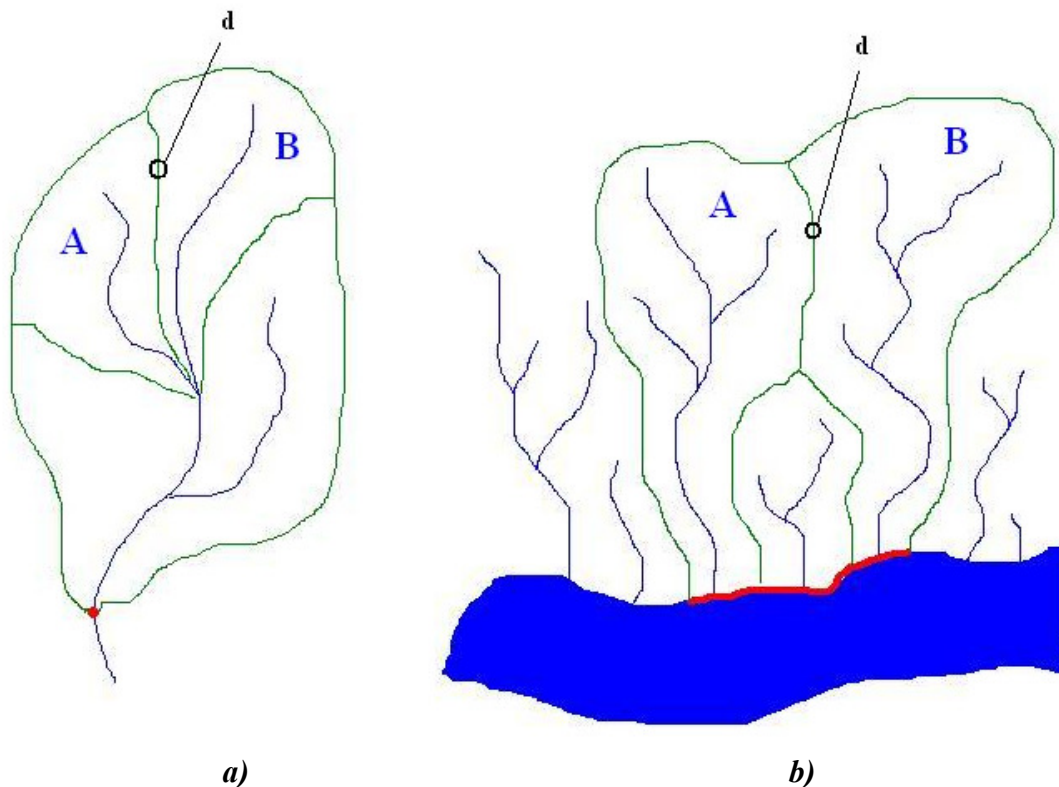


Figura1. - Esquema de una cuenca vertiente: a) definido a partir de un punto o sección situado en el cauce, b) establecida como suma de todas las cuencas vertientes cuyos puntos de referencia se ubican en una misma línea común. La línea *d*, correspondiente a la divisoria de aguas entre las cuencas A y B, forma parte de dos polígonos diferentes, uno que constituye el perímetro de la cuenca A y otro que constituye el perímetro de la cuenca B.

La delimitación de las cuencas hidrográficas se realiza mediante el trazado de las divisorias de aguas. Éstas son líneas que separan la parte del territorio en la que la escorrentía superficial generada en ella, incluso la escorrentía subterránea en la mayor parte de las situaciones, se dirige a la red de drenaje situada aguas arriba de la localización que se toma de referencia para delimitar la cuenca; separando con ello el resto del territorio, en el que la escorrentía no se dirige a ella. Como esta localización, que en general se asocia a un punto, es básicamente la sección transversal al cauce en dicha posición, conceptualmente tiene una dimensión lineal. La sección transversal utilizada para la definición de una cuenca hidrográfica forma parte de la divisoria de aguas de dicha cuenca aún cuando el flujo le atraviese; circunstancia que no ocurre con el resto de la línea divisoria. Este concepto de sección transversal, como parte de la divisoria que delimita una cuenca vertiente, se puede generalizar a una línea más amplia cuando se trate de vertientes directas a masas de agua, como se muestra en el gráfico b) situado a la derecha en la Figura 1. Asimismo una línea divisoria forma parte de la delimitación de dos cuencas hidrográficas, como se observa en ambos gráficos de la Figura 1 donde la línea *d* forma parte de la divisoria de aguas de la cuenca **A** y también de la cuenca **B**.

Las divisorias de aguas son siempre las mismas, independientemente del nivel de detalle o agregación con el que se realice la división hidrológica del territorio, que depende, como ya se ha comentado, del número de puntos de referencia utilizados en esta tarea. Estas divisorias pueden ser dibujadas y utilizadas o no, en función del nivel del trabajo; pero no dejan de existir aunque no sean representadas.

En el caso de utilizar una línea para definir la cuenca hidrográfica, ésta también formará parte de la divisoria.

Asimismo, la red de drenaje es infinita, pero solo se representa aquella parte que interesa y responde al nivel de detalle que exige el trabajo. La red *total*, al igual que las divisorias de aguas, es invariable y no depende de la decisión administrativa que fije el nivel de análisis. Lo que sí ocurre es que, dependiendo del nivel elegido, la representación de estas realidades invariables (divisorias y redes de drenaje), se hace con mayor o menor precisión. No hay duda de que el territorio puede sufrir variaciones en su morfología por causas naturales o artificiales que modifiquen estos elementos; pero si se asume que los cambios, al nivel de la escala a la que se desarrolla la gestión hidrológica del territorio, no llegan a ser significativos; se puede asumir también esta invariabilidad.

Los distintos niveles de precisión son los causantes de las discrepancias habituales entre las distintas fuentes de información que suministran este tipo de datos hidrológicos.

OBJETIVOS

Se ha tratado de establecer un método de codificación de carácter universal, para los elementos que constituyen la base de la organización del esquema hidrológico; que permita compartir información de forma sencilla y crear bases de datos geográficos actualizables con estos elementos. De esta forma los elementos irán adquiriendo mayor precisión dentro de las bases de datos, y los resultados de los trabajos que se vayan realizando alimentaran a éstas, mejorando el trazado y posicionamiento de los elementos; que nunca alteran su situación geográfica general.

METODOLOGÍA

Para poder codificar los elementos se precisa realizar previamente una división conceptual del territorio en cuencas hidrográficas y asignarlas algún tipo de identificación.

Con este propósito se planteó un código de 5 niveles con dos dígitos para cada nivel. Este sistema de doble dígito recuerda la idea de la Clasificación Decimal empleada por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX para clasificar los ríos españoles (1965); aunque el sentido adoptado en esta ocasión es diferente, comenzando por la desembocadura para terminar en la cabecera. De este modo cada cuenca queda codificada con 10 dígitos según el siguiente esquema:

AABBCCDDEE

Donde:

- AA* correspondería con un primer nivel (gran cuenca internacional, continente, país, ...)
- BB* correspondería con un segundo nivel (gran cuenca continental, cuenca nacional, ...)
- CC* correspondería con un tercer nivel (cuenca regional, afluente importante, ...)
- DD* correspondería con un cuarto nivel (cuenca local a un primer nivel, ...)
- EE* correspondería con un quinto nivel (cuenca local a un segundo nivel, ...)

Este método abre espacio para 99 cuencas por cada nivel y, en principio, con la posibilidad de utilizar cualquier procedimiento para asignarlas. Además, una vez establecida la base de datos, resulta sencillo realizar reasignaciones o re-codificaciones si fuesen necesarias en un momento dado.

Para la asignación de la numeración se optó por el procedimiento de PFAFSTETTER (1989) pero, como se ha apuntado anteriormente, utilizando 2 dígitos en cada nivel, ello aportó una estructura lógica y secuencial de cuencas vertientes dentro de cada unidad hidrológica, permitiendo llegar a un número elevado de cuencas hidrográficas dentro de cada nivel.

En el método PFAFSTETTER, una vez fijada una gran zona vertiente, siguiendo su eje principal se eligen las cuatro cuencas internas más importantes y se les asignan los códigos pares 2, 4, 6 y 8 y a las áreas que quedan entre los puntos de salida correspondientes a dichas cuencas se les asigna, también por orden, los números impares 1, 3, 5, 7. Finalmente, a la zona de cabecera se le asigna el 9. De esta forma quedan ordenadas las áreas vertientes: La cuenca 9 vierte sus aguas en el mismo punto que la 8 y la suma de los dos flujos pasa a la 7, la cual vierte en el mismo punto que la 6 y la suma de los dos flujos pasa a la 5. Así sucesivamente hasta que todo el flujo llega al punto de salida de la gran cuenca. Si hay alguna zona endorreica se codifica con el número 0. Cada una de las áreas vertientes, codificadas de 0 a 9, se puede volver a dividir de la misma forma a un nivel inferior (Figura 2).

Pero el método de PFAFSTETTER limita a 5 cuencas las que se pueden identificar en un mismo nivel. Si el río es largo, es fácil encontrar más de 5 grandes afluentes a los que sería lógico codificar dentro de un mismo nivel. Por esta razón, el esquema propuesto fue el mismo pero, en lugar de usar un solo dígito por nivel, utilizando dos dígitos por cada nivel; asignando los números pares a las cuencas de los afluentes seleccionados y los impares a las zonas intercuenas vertientes al cauce que constituye el eje principal, con lo que dentro de un nivel se podía llegar a identificar hasta 49 cuencas de afluentes importantes en lugar de 4 (Figura 3). A la cuenca de cabecera del río principal le correspondería el número impar más alto. Las posibles zonas endorreicas quedarían codificadas utilizando los siguientes números

impares pero sin que existan cuencas con los números pares intermedios, de esta forma quedaría identificada la no conexión de dichas áreas con el resto de la cuenca. También se comenzaría a codificar, iniciando en un número impar superior a los utilizados hasta ese momento, sin enlace secuencial con las que hasta entonces se hubiesen codificado, otras cuencas que, aún estando en el área principal etiquetada, no viertan al cauce principal que configura el sistema (lo que ocurre cuando el área principal posee un tramo vertiente directamente al mar) en el cual puedan existir cauces de cierta importancia.

Cuando el elemento de salida de una cuenca es una línea, para la parte del terreno de la citada cuenca que vierta directamente a dicha línea y que no forme parte de una cuenca de menor nivel establecida en dicha zona, se reservarían los dígitos 99

Realizado el esquema de codificación, se procede a la determinación de los puntos de la red de drenaje que van a determinar las cuencas vertientes. A partir de ellos se digitalizan las divisorias y se divide la red de drenaje en tramos.

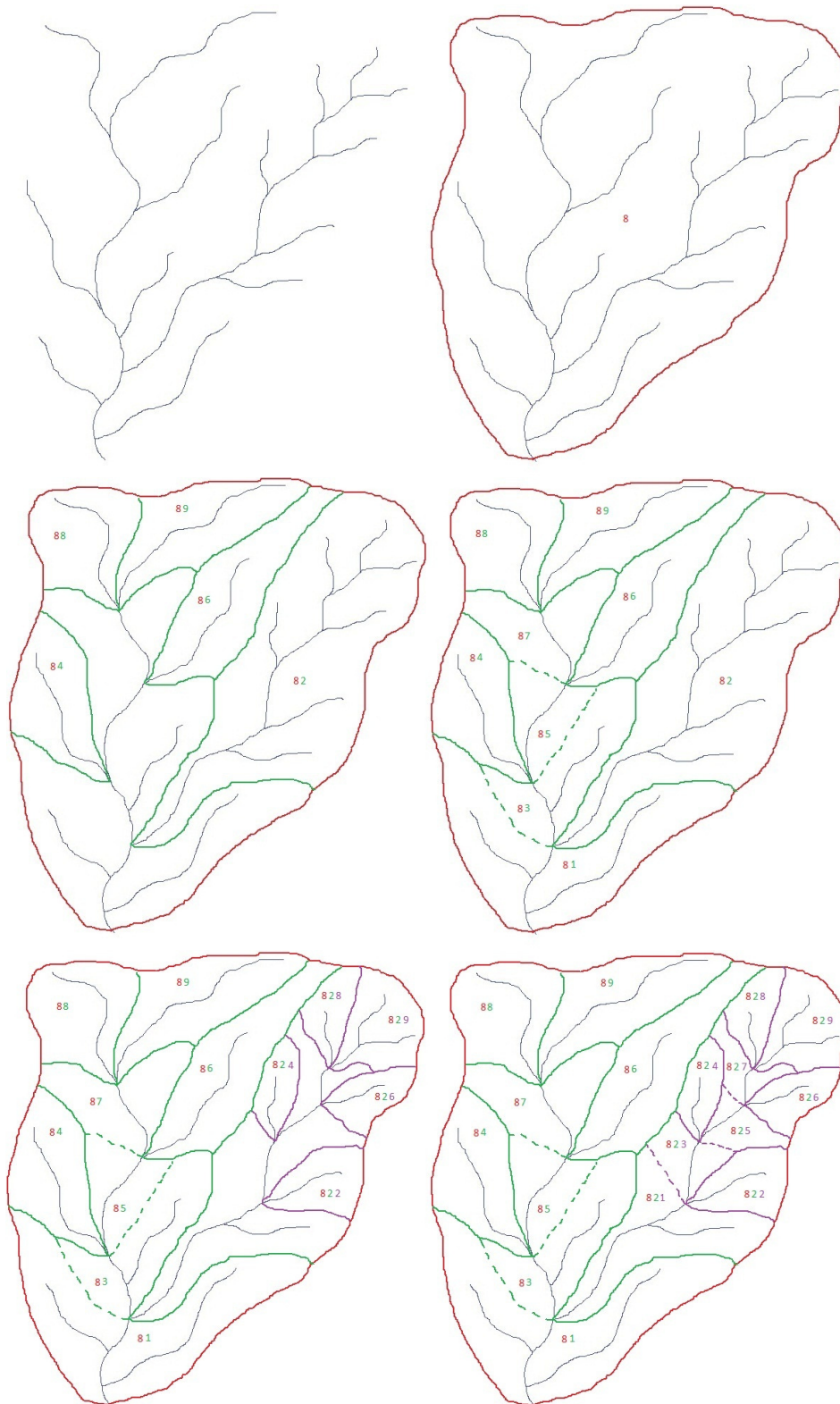


Figura 2. Clasificación de los cursos de una cuenca vertiente siguiendo el procedimiento establecido por PFAFSTETTER (1989)



Figura 3. Nuevo procedimiento para clasificar secuencialmente las cuencas hidrográficas basado en una modificación del establecido por PFAFSTETTER (1989) consistente en aumentar a dos dígitos el código de cada nivel.

Una vez fijadas las divisorias se procede a constituir los polígonos de las cuencas vertientes delimitadas por ellas. Los elementos que se codifican son:

- **Punto de Control de Flujo (PCF)**, que es el punto de partida en la delimitación de la cuenca vertiente. Cada PCF tiene asociada una **Línea de Control de Flujo (LCF)**, que representa el perímetro mojado máximo de la sección transversal que ocupa el flujo. La dimensión de estas líneas tiene que ser tal que a través de ellas y, entre sus extremos, cruce la totalidad del flujo correspondiente a las máximas avenidas posibles, es decir, que la amplitud o ancho de la zona de inundación en la ubicación analizada nunca puede llegar a ser más amplia que la longitud de dichas líneas. El PCF será un punto concreto de la LCF. Las LCF forman parte de la divisoria de la cuenca vertiente. Puede darse el caso de que una LCF abarque más de un cauce

si el área que se está delimitando, corresponde con una vertiente directa a una masa de agua o zona de inundación.

- **Tramos de la red de drenaje.** Delimitados entre dos PCF situados aguas arriba y aguas abajo respectivamente. El caudal que sale del tramo por el PCF inferior, es la suma del que entra por el PCF superior más la aportación de la cuenca vertiente a dicho tramo de forma lateral.

- **Área de inundación del tramo.** Representa la superficie que puede ser ocupada por el flujo. En realidad no es un área fija al ser función del caudal circulante. Para su representación se puede utilizar el concepto de Dominio Público Hidráulico asociado al tramo considerado.

- **Cuenca vertiente a un tramo.** Representa la cuenca vertiente al PCF inferior menos la cuenca vertiente al PCF superior. Se considera que una cuenca vertiente de cabecera es un caso particular, en la que no hay en la parte superior del tramo entrada de flujo proveniente de un territorio ajeno a la cuenca vertiente en cuestión. En este caso particular, el tramo correspondiente a una cuenca de cabecera estará delimitado aguas arriba por un PCF que será un punto del cauce principal de la cuenca de cabecera, más o menos centrado en la superficie de ésta (también se podría considerar el nacimiento del río), al que se le asignase una cuenca vertiente nula.

- **Líneas divisorias de aguas.** Se representan aquellas necesarias para delimitar las distintas partes del territorio que vierte a cada PCF.

RESULTADOS DE LA METODOLOGÍA

Punto de Control de Flujo (PCF) y Línea de Control de Flujo LCF

Se codifica en función de su posición geográfica, utilizando los valores de sus coordenadas geográficas en el sistema WGS84, en formato decimal (41,3582°), buscando el carácter universal que se quiere dar al método de codificación. Cada punto tiene un código formado por 19 dígitos, según el siguiente esquema:

pcfABBBCCCCEEEEEFFF

Donde cada dígito representa lo siguiente:

pcf, son los tres dígitos indicadores del tipo de punto de que se trata. Estos dígitos pueden cambiarse por otros si el responsable del trabajo de codificación lo entiende conveniente, pero manteniendo su número.

ABBBCCC, longitud del punto en grados decimales en el sistema WGS84. *A=0* significa ESTE y *A=1* significa OESTE, *BBB* es la parte entera de la coordenada y *CCCC* son los cuatro primeros decimales.

EEEEFFFF, latitud del punto en grados decimales en el sistema WGS84. *D=0* significa NORTE y *D=1* significa SUR, *EEE* es la parte entera de la coordenada y *FFFF* son los cuatro primeros decimales.

Se ha considerado que, en los estudios hidrológicos a los que se va aplicar este método, la codificación del punto estableciendo cuatro decimales de grado, hace que resulte muy difícil que en el caso de presentarse la necesidad de utilizar dos puntos que estén muy próximos entre sí, éstos puedan llegar a tener el mismo código.

La ***línea de control de flujo asociada*** (LCF) tendrá el mismo código que el PCF, salvo que los tres dígitos iniciales, que serán *lcf*. Estas líneas formarán parte de la divisoria de las cuencas vertientes correspondientes.

En el caso de que la línea de salida que se utilice para delimitar el área vertiente fuese de dimensiones considerables, el PCF corresponderá a un punto de la línea más o menos centrado. Operativamente es más práctico y lógico digitalizar primero las LCF y determinar de forma automática los PCF como los puntos de corte de las LCF con los ejes de los cauces previamente digitalizados.

Tramos de la red de drenaje

Los PCF, más concretamente sus LCF asociadas, dividen la red de drenaje previamente trazada en *tramos*, cuyo código también será de 19 dígitos en los que los 16 últimos coincidirán con los del PCF superior del tramo. Los tres primeros tendrán el siguiente esquema:

$$rXX$$

Donde *XX* representa el nivel de detalle con el que está digitalizado el tramo:

Si está digitalizado sobre una cartografía 1:50.000, *XX* será 50

Si está digitalizado sobre una cartografía 1:5.000, *XX* será 05

Si está digitalizado sobre una cartografía igual o superior a 1:100.000, *XX* será 99.

Si el trazado corresponde a una aproximación, *XX* será *xx*.

Cada tramo tiene una base de datos asociada, con al menos tres campos: uno con el código del PCF superior (PCF_S), que coincidirá en sus 16 últimos dígitos con el código del tramo; otro con el código del PCF inferior (PCF_I) y un tercero con el código del PCF de enlace (PCF_E). Este último es el punto superior del tramo al que vierte sus aguas el tramo que se está considerando. Si se trata de un tramo que vierte a otro situado inmediatamente aguas abajo dentro de un mismo cauce, los campos PCF_I y PCF_E serán el mismo. Si el tramo en cuestión es el último tramo de un afluente que desemboca en un cauce mayor, el PCF_I será el correspondiente a la sección final del afluente, antes de la desembocadura, y el PCF_E será el correspondiente a la sección transversal del cauce principal al cual vierte el afluente, justo después de la confluencia. A través de ésta última sección pasará, ya de forma integrada, la suma del caudal que aporta el afluente y el caudal que viene por el cauce principal (Figura 4).

Área de inundación del tramo

Las LCF delimitan superior e inferiormente al *área de inundación* de cada tramo, que se pueden entender también como el Dominio Público Hidráulico. Éste mantendrá el mismo código que el del tramo al que corresponde, pero comenzando por:

$$iXX$$

Donde *XX* representa el nivel de detalle con el que se ha digitalizado el área de inundación, de acuerdo con la misma codificación anteriormente establecida para el tramo.

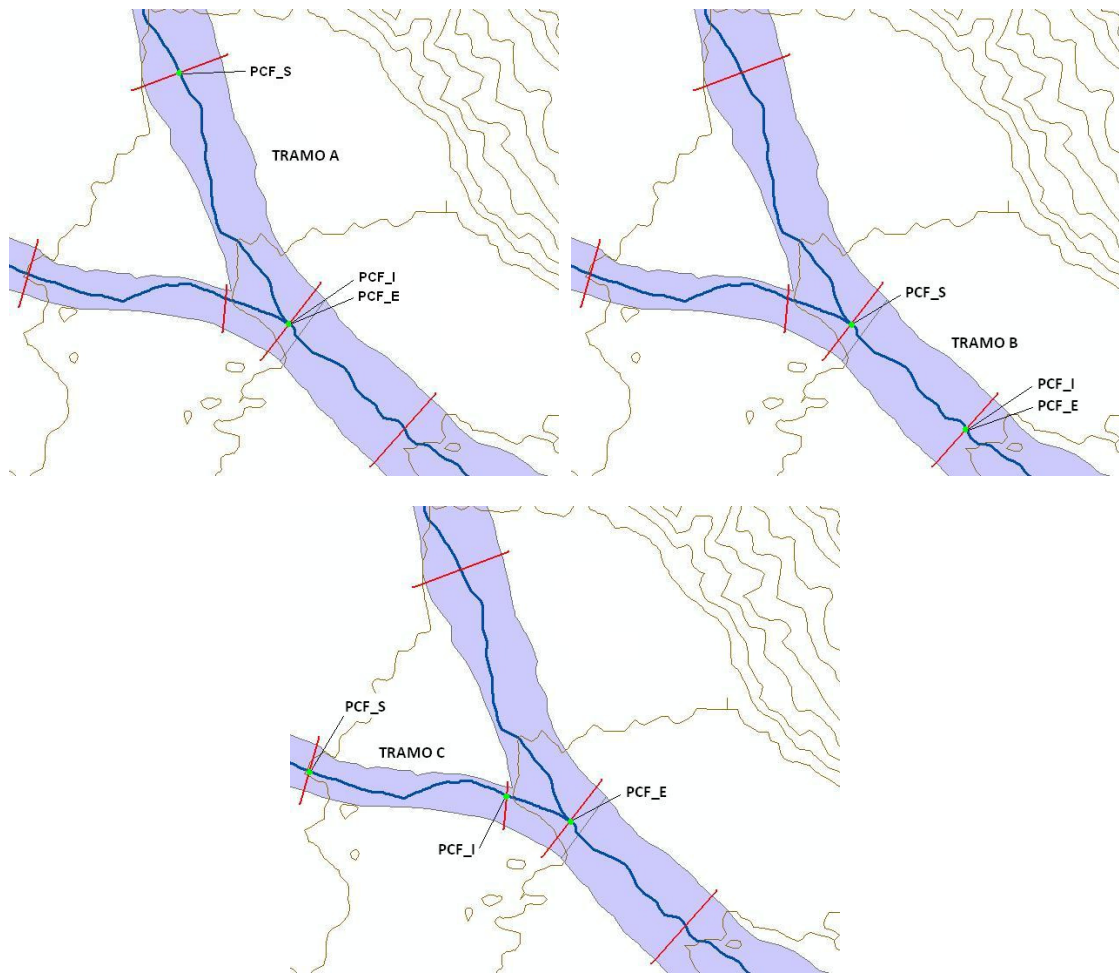


Figura 4. Ejemplo de situación de los PCF_S, PCF_I y PCF_E en la esquematización de varios tramos de una red de drenaje.

Cuenca vertiente a un tramo

Las *cuenca vertientes* a un tramo se constituyen a partir de las divisorias de aguas trazadas previamente. El código de estas superficies tendrá 19 dígitos y, al igual que los tramos de la red de drenaje, compartirá con ellos y con el PCF superior del tramo los últimos 16 dígitos, siendo los tres primeros: *cue*

En la base de datos asociada existirá un campo en el cual figure el código jerárquico de la cuenca vertiente a la que pertenece según el método propuesto en esta metodología.

Los PCF y LCF, codificados como se ha expuesto, junto con los tramos de río y las cuencas vertientes a dichos tramos, pueden conservar la codificación indefinidamente; aunque en un momento dado se decida cambiar la numeración o código jerárquico que, a distintos niveles (4) presentan las cuencas, ya que sólo dependen de su posición geográfica, en principio, invariable.

En la Figura 5 se muestra un ejemplo de codificación de estos elementos para unos valores de coordenadas ficticios (111,1111 222,2222 ...).

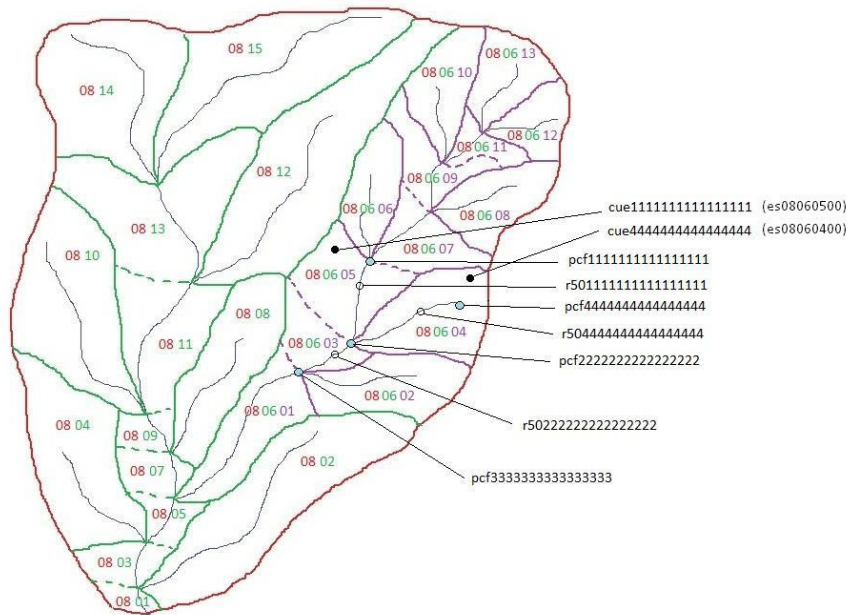


Figura 5. Ejemplo de la codificación de los diferentes elementos hidrológicos definidos en la metodología del SICAEH establecida en este documento

Líneas divisorias de aguas

Como cada divisoria de aguas separa dos cuencas vertientes, y por tanto forma parte a la vez de dos posibles polígonos, en el código de este tipo de líneas tendrá que aparecer la referencia a dichas cuencas. Por otro lado, al igual que la red de drenaje, puede tener distintos niveles de digitalización o representación en función del detalle de la base cartográfica utilizada para su delineación. En consecuencia, su código tiene 25 dígitos y presenta el siguiente esquema:

dXX-AABBCCDDEE-FFGGHHIIJJ

Donde:

Los tres primeros dígitos (primera parte del código) hacen referencia al nivel de detalle en la digitalización. Respecto a los términos *XX*, se sigue los criterios definidos en el epígrafe dedicado a los tramos de río.

Los dígitos *AABBCCDDEE* (segunda parte) corresponden al código de una de las cuencas de cuya divisoria forma parte dicha línea y *FFGGHHIIJJ* (tercera parte) al código de la otra cuenca.

Cada línea divisoria etiquetada corresponde a una porción de la separación hidrológica entre dos cuencas pertenecientes a un mismo nivel. En las dos partes de la etiqueta (segunda y tercera) los dígitos correspondientes a niveles anteriores serán iguales y los correspondientes a niveles posteriores serán 0. Por ejemplo, una divisoria entre dos cuencas dentro del segundo nivel (la "19" y la "83") dentro de Argentina (suponiendo un primer nivel asociado distintos países) estaría etiquetada con el siguiente código:

d50-ar83000000-ar19000000

Esta estructura se mantiene en los niveles inferiores, como se muestra en los siguientes ejemplos.

Si la divisoria corresponde a una subcuenca de un nivel inferior a los cinco establecidos (al comienzo de exposición de la metodología), el código será más simple y solo tendrá los 10 caracteres de la cuenca de quinto nivel a la que pertenece. La segunda secuencia de dígitos se sustituirá por una cadena de caracteres única (por ejemplo “*interna000*”, con el fin de completar los 25 dígitos). El código de la divisoria quedaría representado por:

d50-ar83010102-interna000

Pudiéndose aprovechar esta última secuencia para establecer dos niveles más de dos dígitos cada uno. En este caso los 10 dígitos se dividen en dos grupos de 5, con los cuales se puede proceder a una división interna de la subcuenca, siguiendo los mismos criterios comentados con anterioridad. Esta parte del código quedaría “*-0102-0104*”, por ejemplo, que representaría en este caso una divisoria entre las cuencas *0102* y *0104* pertenecientes a la cuenca superior *ar83010102*.

d50-ar83010102--0102-0104

Las divisorias por debajo de estos siete niveles se pueden codificar de manera única con los últimos 5 dígitos como

d50-ar83010102--0102-int0

A modo de ejemplo, suponiendo que la cuenca que aparece en la Figura 6 es una cuenca importante dentro de España, a la que se le asigna un primer nivel con los dígitos “*eu*” de Europa y un segundo nivel con los dígitos “*es*”, para distinguirla de otras no administradas por España. Suponiendo que la cuenca esté codificada a un tercer nivel (dentro de España) con el número 08, a las divisorias les correspondería los códigos que aparecen en la Figura 6.

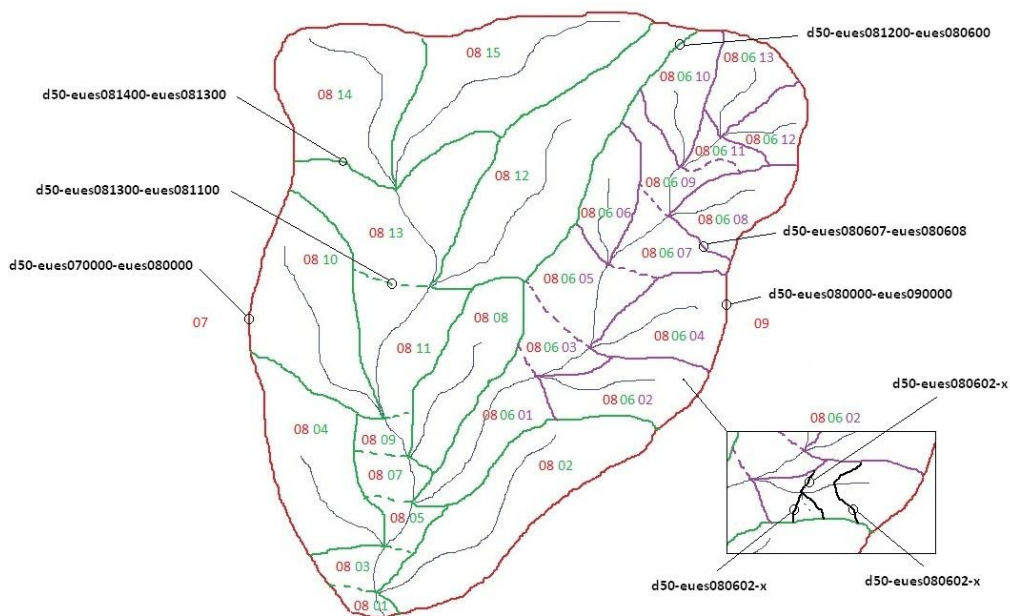


Figura 6. Representación de las Líneas divisorias de aguas correspondientes a una cuenca española codificada con 08 en su correspondiente nivel dentro del territorio español “*es*”, que a su vez se integra en el continente europeo “*eu*”. El recuadro de la figura representa un detalle de la codificación.

En el caso de existir líneas de control de flujo (LCF), estas formarán parte de las divisorias y se codificarían del mismo modo, comenzando por la letra *I*. Por ejemplo:

150-eues080600-eues080500

Consideraciones particulares en el caso de embalses o grandes áreas de inundación

La utilización del proceso secuencial de asignación numérica propuesta por PFAFTETTER implica una secuencia alternativa de tramo medio y afluente en el orden de concentración de flujo en la red de drenaje analizada. En un cauce ordinario es fácil esquematizar el orden comentado, salvo que dos afluentes importantes desemboquen justamente en el mismo punto del cauce principal, pero siempre se puede considerar que uno de ellos confluye un poco antes que el otro y aplicar el método, quedando el tramo medio del cauce principal, delimitado entre los dos afluentes, con una superficie muy reducida.

En el caso de tener un embalse grande o una zona de inundación prácticamente llana, es difícil determinar los límites de los tramos medios resultantes de la asignación ordenada y secuencial de los códigos de cuenca, así como la delimitación de la *zona de inundación* correspondiente a cada tramo.

A continuación se expone un criterio para delimitar las cuencas y las *zonas de inundación* en estos casos, ilustrándolo con los gráficos de la Figura 7. Para ello se utiliza el concepto previamente descrito de LCF (Línea de Control de Flujo) y se realizan las operaciones siguientes:

- 1) Se fijan los cauces vertientes al área en cuestión (embalse, planicie de inundación, etc.) que se consideren principales y a los que se le quiera asignar un código de cuenca propio.
- 2) Se traza por el área analizada (embalse,....etc.) una red simple, siguiendo el camino lógico de los flujos, si la pendiente del terreno permitiera a estos circular como si estuvieran haciéndolo por una red hidrográfica ordinaria.
- 3) Se delimitan y codifican las cuencas vertientes apoyándose en dicha red.
- 4) Se trasladan los puntos de salida de las cuencas, correspondientes a los afluentes importantes, al punto de corte de cada afluente con la línea de máxima inundación y se establece como sección de salida de la cuenca, al tramo de esta línea situado entre las dos divisorias de aguas previamente trazadas. La porción de superficie entre esta nueva línea y la desembocadura teórica del afluente pasa a pertenecer al tramo medio del cauce principal, situado aguas abajo del punto teórico de confluencia.
- 5) La suma de las áreas de inundación de los tramos medios (cuencas impares) constituye el área del embalse o de la masa de agua a la que vierten los afluentes en cuestión.

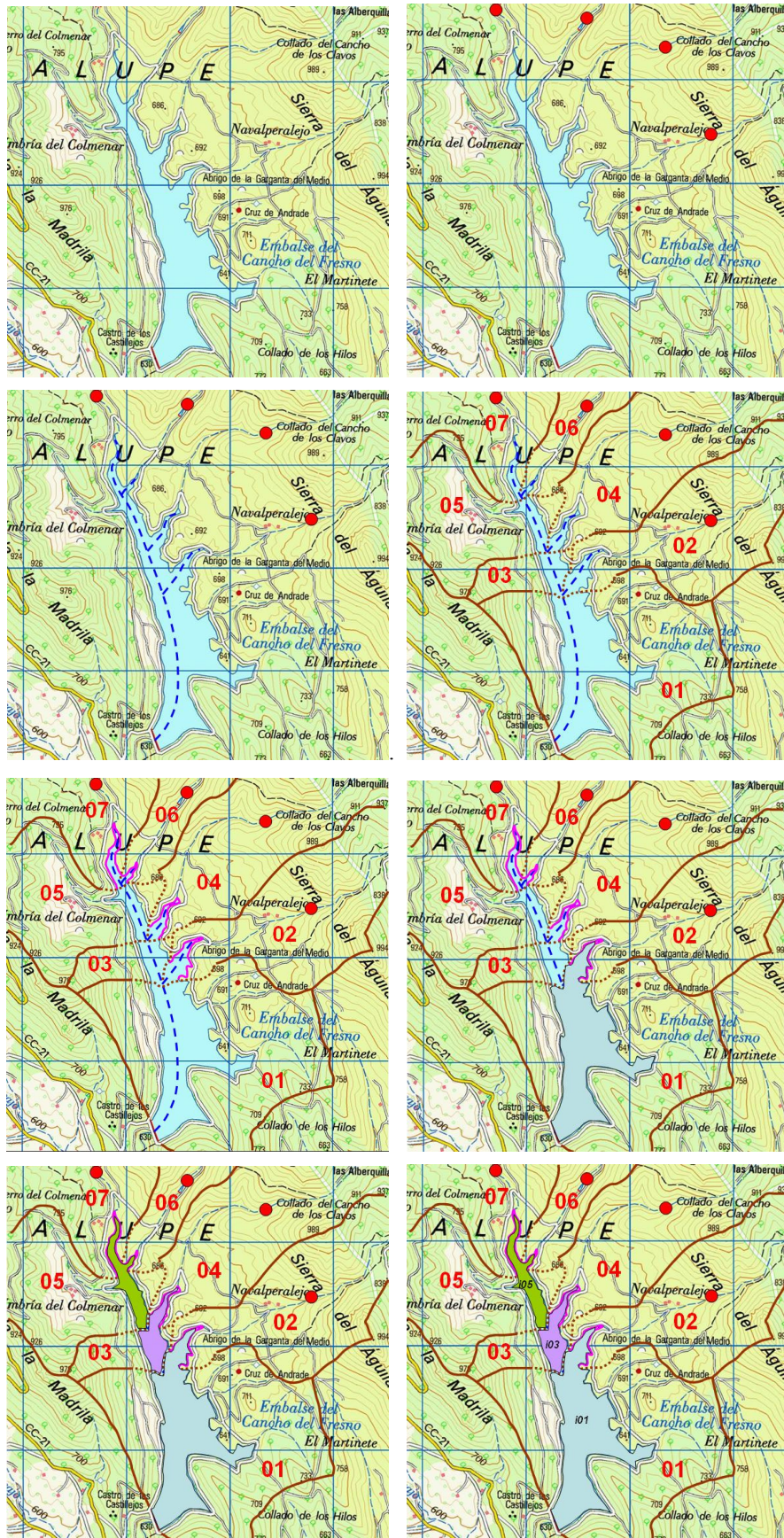


Figura 7. Secuencia de metodología seguida para la delimitación jerárquica de cuencas en el caso de áreas vertientes a un embalse, utilizando el concepto de Línea de Control de Flujo.

Aplicación de la metodología SICAEH a la codificación de las cuencas hidrográficas de la Provincia de Jujuy (Argentina)

Se procede a continuación a la aplicación de la metodología SICAEH, desarrollada en este documento, a la codificación de las cuencas hidrográficas de la Provincia de Jujuy (Argentina). Estrictamente, para esta labor se debería partir de unos criterios para asignar niveles a los distintos cauces de la red de drenaje, que tendrían que responder a un acuerdo nacional e internacional al respecto. Dado que la codificación que se va a realizar pretende, en principio, simplemente servir de ejemplo para éste documento, se van a asumir los criterios que se exponen a continuación:

- 1) Como primer nivel se consideran las cuencas del continente Americano que vierten al océano Atlántico y para codificarlas se emplean los dígitos *SA*.
- 2) Dentro de la vertiente mencionada se analiza la cuenca del río Paraná, que vierte sus aguas al océano Atlántico en el Mar del Plata. A esta cuenca, que le corresponderá un número ordenado dentro de dicha vertiente americana a determinar, se la codifica como: *XX*.
- 3) De esta forma todas las cuencas de este río comenzarán sus códigos por los cuatro dígitos *SAXX*.

A partir de este punto se seguirá la codificación identificando los afluentes importantes a lo largo de todo el cauce principal del río Paraná. Como referencia para la identificación de estos cauces se ha empleado la información que contiene la cobertura digital en formato shape descargada del sitio web de *Natural Earth*, donde se dispone de información cartográfica de libre disposición, a nivel mundial, y con diversas escalas de detalle. La dirección de descarga del shape en cuestión es:

<http://www.naturalearthdata.com/http://www.naturalearthdata.com/download/10m/physical/10m-rivers-lake-centerlines.zip>

Como afluentes principales se han identificado y codificado, junto con los tramos intermedios correspondientes al cauce principal del río Paraná, los que figuran en la Tabla 1. En dicha tabla aparecen también las codificaciones correspondientes a las cuencas internas del río Bermejo. No se ha profundizado en la codificación de los tramos de río y de las subcuencas asociadas a cada tramo, labor más detallada que habría que llevar a cabo con posterioridad a la codificación de cuencas comentada.

Tabla 1. Codificación hidrológica correspondiente al río Paraná. Distintos niveles de codificación acercándonos en detalle hacia el Río Grande – San Francisco, en la Provincia de Jujuy (Argentina). En esta última cuenca se mencionan los Puntos de Control de Flujo sobre los que se apoya la división hidrológica de la misma.

RÍO - CUENCA	CÓDIGO	OBSERVACIONES	PCF determinante
<i>RÍO PARANÁ</i>	<i>NIVEL 3</i>		
PARANÁ	SAXX010000	TRAMO MEDIO	
URUGUAY	SAXX020000	CABECERA	
PARANÁ	SAXX030000	TRAMO MEDIO	
CARCARAÑA	SAXX040000	CABECERA	
PARANÁ	SAXX050000	TRAMO MEDIO	
SALADO	SAXX060000	CABECERA	
PARANÁ	SAXX070000	TRAMO MEDIO	
PARAGUAY	SAXX080000	CABECERA	
PARANÁ	SAXX090000	TRAMO MEDIO	
IGUAZÚ	SAXX100000	CABECERA	
PARANÁ	SAXX110000	TRAMO MEDIO	
IVAI	SAXX120000	CABECERA	
PARANÁ	SAXX130000	TRAMO MEDIO	
IVINHEIMA	SAXX140000	CABECERA	
PARANÁ	SAXX150000	TRAMO MEDIO	
PARANAPANEMA	SAXX160000	CABECERA	
PARANÁ	SAXX170000	TRAMO MEDIO	
VERDE	SAXX180000	CABECERA	
PARANÁ	SAXX190000	TRAMO MEDIO	
TIETE	SAXX200000	CABECERA	
PARANÁ	SAXX210000	TRAMO MEDIO	
GRANDE	SAXX220000	CABECERA	
PARANÁ	SAXX230000	TRAMO MEDIO	
VERDE	SAXX240000	CABECERA	
PARANÁ	SAXX250000	TRAMO MEDIO	
BOIS	SAXX260000	CABECERA	
PARANÁ	SAXX270000	TRAMO MEDIO	
CORUMA	SAXX280000	CABECERA	
PARANÁ	SAXX290000	CABECERA	
SISTEMA SERRANO	SAXX510000	C. ENDORREICA	
MAR CHIQUITA	SAXX530000	C. ENDORREICA	
PUNA	SAXX550000	C. ENDORREICA	
<i>RÍO URUGUAY</i>	<i>NIVEL 4</i>		
URUGUAY	SAXX020100	TRAMO MEDIO	
NEGRO	SAXX020200	CABECERA	
URUGUAY	SAXX020300	TRAMO MEDIO	
IBICUI	SAXX020400	CABECERA	
URUGUAY	SAXX020500	CABECERA	
<i>RÍO PARAGUAY</i>	<i>NIVEL 4</i>		
PARAGUAY	SAXX080100	TRAMO MEDIO	
BERMEJO	SAXX080200	CABECERA	
PARAGUAY	SAXX080300	TRAMO MEDIO	
PILCOMAYO	SAXX080400	CABECERA	
PARAGUAY	SAXX080500	TRAMO MEDIO	
JEJUI GUAZO	SAXX080600	CABECERA	
PARAGUAY	SAXX080700	TRAMO MEDIO	

RÍO - CUENCA	CÓDIGO	OBSERVACIONES	PCF determinante
VERDE	SAXX080800	CABECERA	
PARAGUAY	SAXX080900	TRAMO MEDIO	
MIRANDA	SAXX081000	CABECERA	
PARAGUAY	SAXX081100	TRAMO MEDIO	
TAQUARI	SAXX081200	CABECERA	
PARAGUAY	SAXX081300	TRAMO MEDIO	
CORIXA GRANDE	SAXX081400	CABECERA	
PARAGUAY	SAXX081500	TRAMO MEDIO	
ITIQUIRA	SAXX081600	CABECERA	
PARAGUAY	SAXX081700	CABECERA	
<i>RÍO BERMEJO</i>	<i>NIVEL 5</i>		
BERMEJO	SAXX080201	TRAMO MEDIO	
BERMEJITO	SAXX080202	CABECERA	
BERMEJO	SAXX080203	TRAMO MEDIO	
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204	CABECERA	
BERMEJO	SAXX080205	CABECERA	
<i>RÍO GRANDE – SAN FRANCISCO</i>	<i>NIVEL 6</i>		
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_01	TRAMO MEDIO	
AYO. DE LAS PIEDRAS	SAXX080204_02	CABECERA	pcf1064420510236303
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_03	TRAMO MEDIO	
SANTA RITA	SAXX080204_04	CABECERA	pcf1064431810236426
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_05	TRAMO MEDIO	
23 DE AGOSTO	SAXX080204_06	CABECERA	pcf1064576410237667
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_07	TRAMO MEDIO	
SAN LORENZO	SAXX080204_08	CABECERA	pcf1064619210238351
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_09	TRAMO MEDIO	
LEDESMA	SAXX080204_10	CABECERA	pcf1064650110239087
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_11	TRAMO MEDIO	
NEGRO	SAXX080204_12	CABECERA	pcf1064715010240566
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_13	TRAMO MEDIO	
LAVAYEN	SAXX080204_14	CABECERA	pcf1064693010241870
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_15	TRAMO MEDIO	
AYO. HONDO	SAXX080204_16	CABECERA	pcf1065029010243579
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_17	TRAMO MEDIO	
AYO. CHUQUINA	SAXX080204_18	CABECERA	pcf1065282710241871
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_19	TRAMO MEDIO	
AYO. CHIJRA	SAXX080204_20	CABECERA	pcf1065293410241807
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_21	TRAMO MEDIO	
REYES	SAXX080204_22	CABECERA	pcf1065372910241581
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_23	TRAMO MEDIO	
YALA	SAXX080204_24	CABECERA	pcf1065399110241164
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_25	TRAMO MEDIO	
LOZANO	SAXX080204_26	CABECERA	pcf1065396510240791
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_27	TRAMO MEDIO	
LEÓN	SAXX080204_28	CABECERA	pcf1065430610240289
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_29	TRAMO MEDIO	
AYO. DE ENMEDIO	SAXX080204_30	CABECERA	pcf1065447810239683
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_31	TRAMO MEDIO	
QDA. HUAJRA	SAXX080204_32	CABECERA	pcf1065460210238729
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_33	TRAMO MEDIO	

RÍO - CUENCA	CÓDIGO	OBSERVACIONES	PCF determinante
TUMBAYA GRANDE	SAXX080204_34	CABECERA	pcfl065468310238312
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_35	TRAMO MEDIO	
QDA. PURMAMARCA	SAXX080204_36	CABECERA	pcfl065468510237441
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_37	TRAMO MEDIO	
QDA. HUICHAIRA	SAXX080204_38	CABECERA	pcfl065409110235914
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_39	TRAMO MEDIO	
HUASAMAYO	SAXX080204_40	CABECERA	pcfl065406410235864
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_41	TRAMO MEDIO	
QDA. JUEYA	SAXX080204_42	CABECERA	pcfl065377010235342
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_43	TRAMO MEDIO	
QDA. DE LA HUERTA	SAXX080204_44	CABECERA	pcfl065349210234463
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_45	TRAMO MEDIO	
YACORAITE	SAXX080204_46	CABECERA	pcfl065339510233924
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_47	TRAMO MEDIO	
UQUÍA	SAXX080204_48	CABECERA	pcfl065344510233262
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_49	TRAMO MEDIO	
QDA. DE CALETE	SAXX080204_50	CABECERA	pcfl0653361610232739
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_51	TRAMO MEDIO	
QDA. DE COCTACA	SAXX080204_52	CABECERA	pcfl065350310231968
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_53	TRAMO MEDIO	
QDA. DE CORAYA	SAXX080204_54	CABECERA	pcfl065365510231684
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_55	TRAMO MEDIO	
QDA. DE CHORRILLOS	SAXX080204_56	CABECERA	pcfl065356610231122
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_57	TRAMO MEDIO	
VIZCAYAYOC	SAXX080204_58	CABECERA	pcfl065338310229913
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_59	TRAMO MEDIO	
DE LA CUEVA	SAXX080204_60	CABECERA	pcfl065360110229681
GRANDE - SAN FRANCISCO	SAXX080204_61	TRAMO MEDIO	
CÓNDOR	SAXX080204_62	CABECERA	pcfl065494610229677
DE LA CASA COLORADA (CABECERA)	SAXX080204_63	CABECERA	

En la Figura 8 se muestra un trazado, aproximado en muchos casos, de las divisorias correspondientes a las cuencas que forman parte de la gran cuenca del Río Paraná. Para la delineación de estas divisorias se ha recurrido a la delimitación nacional de cuencas de Argentina, elaborada por la Subsecretaría de Recursos Hídricos, en aquellas zonas que son territorio argentino. En las zonas correspondientes a la Provincia de Jujuy se ha trabajado con mayor detalle, como se aprecia en la Figura 9, al utilizar la cartografía altimétrica a escala 1:50.000, elaborada en el marco de la mencionada Acción Integrada.

Dentro de la cuenca del río Grande – San Francisco se ha procedido a su división siguiendo criterios basados en los cauces existentes en la cartografía provincial, la cual se muestra también en la Tabla 1, en la que se reflejan los códigos de los Puntos de Control de Flujo empleados en la delimitación hidrográfica.

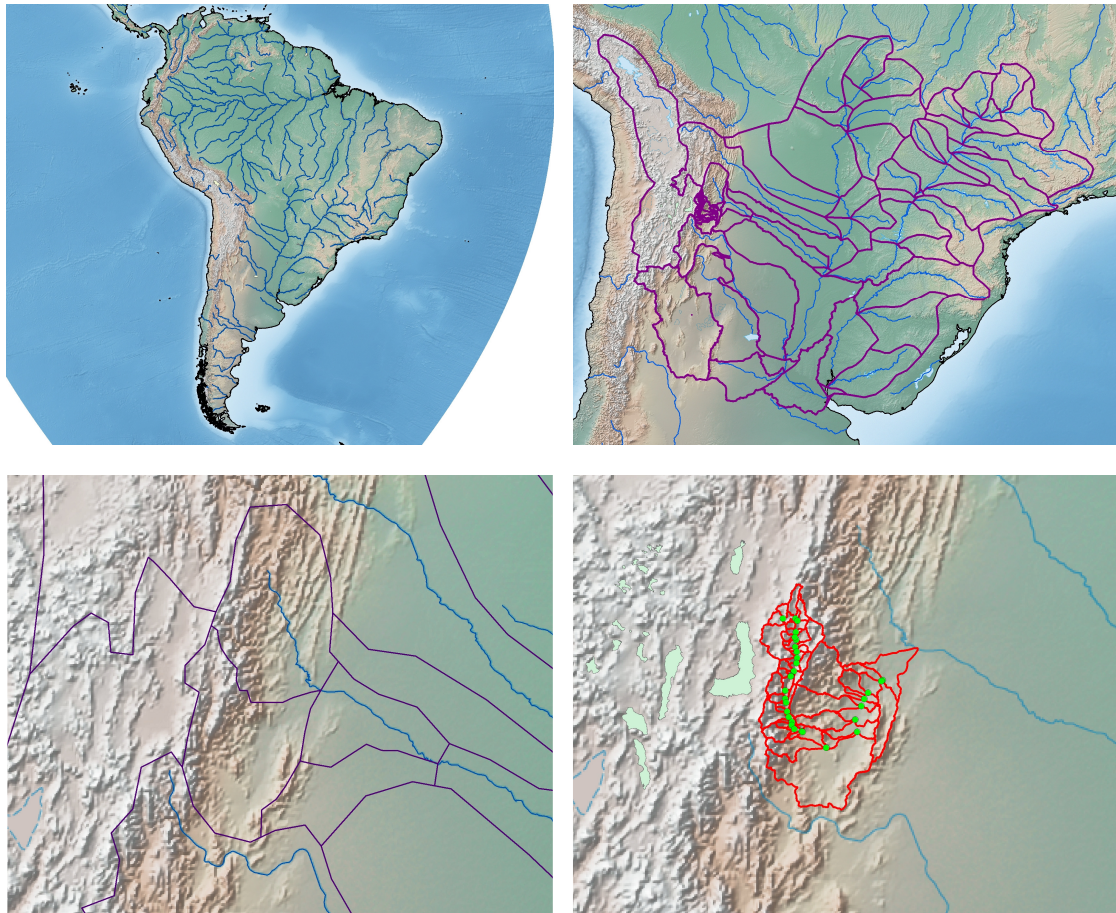


Figura 8. Divisoria de aguas correspondientes a las cuencas hidrográficas en que se ha dividido la cuenca del Río Paraná según la metodología desarrollada y su destalle en la cuenca del Río Grande – San Francisco.

CONCLUSIONES

- 1) Desde una perspectiva general, la metodología SICAEH desarrollada en el presente documento, no sólo propone un sistema de codificación apoyado en el propuesto por PFAFSTETTER, ampliando la capacidad de sus niveles; sino que da importancia a la codificación pensada en el almacenamiento de los elementos geográficos, en los que se apoya la división hidrológica; con el fin de crear una base de datos actualizable y a disposición pública, cuya finalidad puede exceder al ámbito del trabajo hidrológico y ser aplicable en la determinación de límites administrativos, que muchas veces están apoyados en los elementos hidrológicos analizados.
- 2) Atendiendo a consideraciones más específicas del ámbito hidrológico e hidráulico, al permitir la metodología identificar y localizar con detalle los Puntos de Control de Flujo y sus correspondientes Secciones de Control que determinan las divisoria de aguas de cada uno de ellos, se facilita la información necesaria para analizar el tránsito de las avenidas por los cauces en cuestión.
- 3) Además, una vez realizada la división hidrográfica, se puede proceder a *cortar* la red de drenaje y las áreas de dominio público hidráulico o zonas de inundación, con el fin de delimitar los tramos y etiquetarlos, junto a sus áreas vertientes, con el código correspondiente a los Puntos de Control de Flujo asociados a cada tramo. La división de los cauces en tramos

se puede llegar al detalle que se estime oportuno lo que permite establecer elementos de características homogéneas, en los que analizar los problemas de erosiones locales del lecho del cauce.

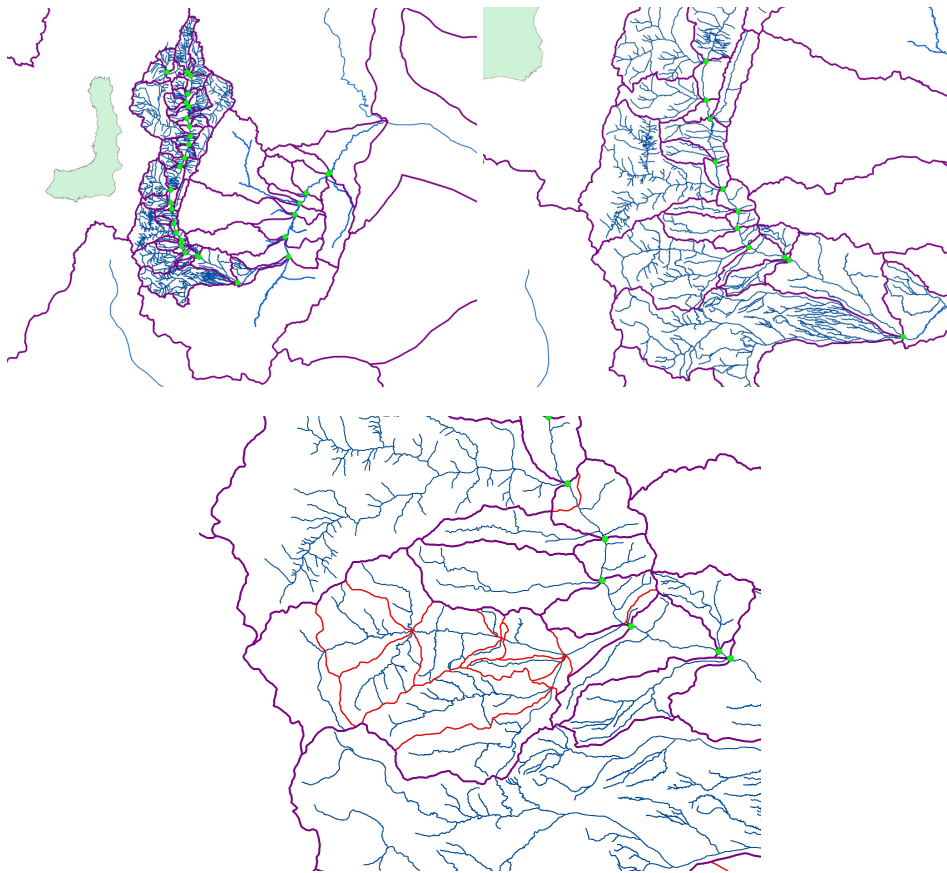


Figura 10. Detalle de la división hidrográfica realizada en la cuenca del Río Grande – San Francisco apoyándose en los Puntos de Control de Flujo elegidos para la realización de la codificación hidrológica propuesta, en el plan de trabajo de la AI. En rojo, detalle de divisiones internas a la división hidrográfica principal.

Agradecimiento. Los autores muestran su reconocimiento a la Agencia Española de Cooperación Internacional y Desarrollo, AECID, por financiar la elaboración de la metodología SICAEH, expuesta en este documento, a través de la Acción Integrada titulada “Implementación de una unidad de estudio, monitorización y control de cuencas hidrográficas con la finalidad de apoyar la toma de decisiones en la gestión a medio y largo plazo en la Provincia de Jujuy (Argentina)” desarrollada entre la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y la Universidad Nacional de Jujuy (UNJu), durante el periodo 2009-11. La metodología ha sido realizada conjuntamente por la Unidad de Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas (UGICH) adscrito a la UNJu, y la Unidad de Hidráulica e Hidrología del Departamento de Ingeniería Forestal de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la UPM.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Centro de Estudios Hidrográficos (1965). *Datos físicos de las corrientes clasificadas por el CEH.* Sección de Publicaciones del Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX, MOP. Madrid.

http://hercules.cedex.es/Informes/Hidrologia/1965-Datos_fisicos_de_las_corrientes_clasificadas_por_el_CEH/cuencas.pdf

Pfafstetter, O. (1989) *Classification of hydrographic basins: coding methodology*, unpublished manuscript, Departamento Nacional de Obras de Saneamento, August 18, Rio de Janeiro (available from **J. P. Verdin**, U. S. Geological Survey, EROS Data Center, Sioux Falls, South Dakota 57198 USA).

Furnans, J., Olivera, F. & Maidment, D. (2001) Area-to-Area Navigation and the Pfafstetter System, MSE Thesis, Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin.

<http://www.crrw.utexas.edu/online.shtml>

Natural Earth. Free vector and raster map data

<http://www.naturalearthdata.com>

Verdin, K. L. (1997) *A System for Topologically Coding Global Drainage Basins and Stream Networks*. Esri International GIS User Conference Proceedings: (6/14/01)

<http://proceedings.Esri.com/library/userconf/proc97/proc97/to350/pap311/p311.htm>

Verdin, K. L. & Verdin, J. P. (1999) A topological system for delineation and codification of the Earth's river basins. *Journal of Hydrology*, 218, 1-2, pp. 1-12.



Instituto de Recursos Hídricos



Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



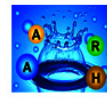
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Invest. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA s.a. INGENIERÍA CIVIL E HIDRÁULICA

