

**XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
LIMA, PERÚ, 28 AL 30 DE SETIEMBRE DE 2016**

**IMPACTO DE LA EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DEL MEANDRO EN EL  
RÍO MAGDALENA SOBRE LA POBLACIÓN DE TACAMOCHO,  
COLOMBIA**

*Eduardo Bravo Gordillo, Mónica Sarache Silva, Rafael Ortiz Mosquera*

*Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Cra 30 No 45 03, (571)3165570, Bogotá D.C., Colombia,  
edubra@yahoo.es, msaraches@unal.edu.co, roortizm@unal.edu.co*

**RESUMEN:**

En el presente documento, inicialmente se realiza una descripción de las condiciones geomorfológicas, morfodinámicas y de inundación que caracterizan a la zona donde se encuentra localizada la población de Tacamocho. Así mismo, se presenta una descripción cualitativa de la evolución morfológica del meandro del río Magdalena aguas arriba de la población y sus impactos asociados. Finalmente, se presentan las acciones propuestas de mitigación para la condición recurrente de inundación y los efectos de erosión sobre la orilla que enfrenta la población en la actualidad y que surgieron a raíz de la nueva configuración morfológica de la zona.

**ABSTRACT:**

In this paper, initially is performed a description of the geomorphological, morphodynamic and flood conditions characterizing the area where the population of Tacamocho is located. Likewise, a qualitative description of the morphological evolution of the Magdalena river meander and its associated impacts is presented. Finally, the proposed mitigation measures for the recurrent flooding and the erosion on the shore effects that people actually face that emerged from the new morphological zone configuration is presented.

**PALABRAS CLAVES:** Inundación; Erosión; Meandro; Mecanismo de estrangulamiento; Mitigación.

## INTRODUCCIÓN

Tacamocho, población del departamento de Bolívar en Colombia, con el transcurso de los años ha presentado grandes problemas de inundación, los cuales han generado una afectación recurrente a los pobladores, su calidad de vida y sus bienes.

Con la ocurrencia del fenómeno de La Niña vivido en Colombia en los años 2010 – 2011, se presentaron caudales extraordinarios en gran parte del país, los cuales ocasionaron que durante un largo periodo el nivel de agua del río Magdalena transitara por encima de la garganta del meandro que se localiza aguas arriba de la población de Tacamocho. Esta condición ocasionó que se presentaran cambios hidrosedimentológicos importantes que conllevaron a una evolución morfológica del meandro hasta llegar a su corta por medio de un mecanismo que hemos denominado de lavado, en contraposición con el mecanismo de corte más común como es el del acercamiento entre las márgenes cóncavas. Dicha rectificación ocasionó que la corriente empezara a incidir de manera diferente sobre la población generando grandes procesos erosivos sobre el talud donde se localiza el centro poblado, destruyendo varias viviendas y gran parte del dique para control de inundaciones.

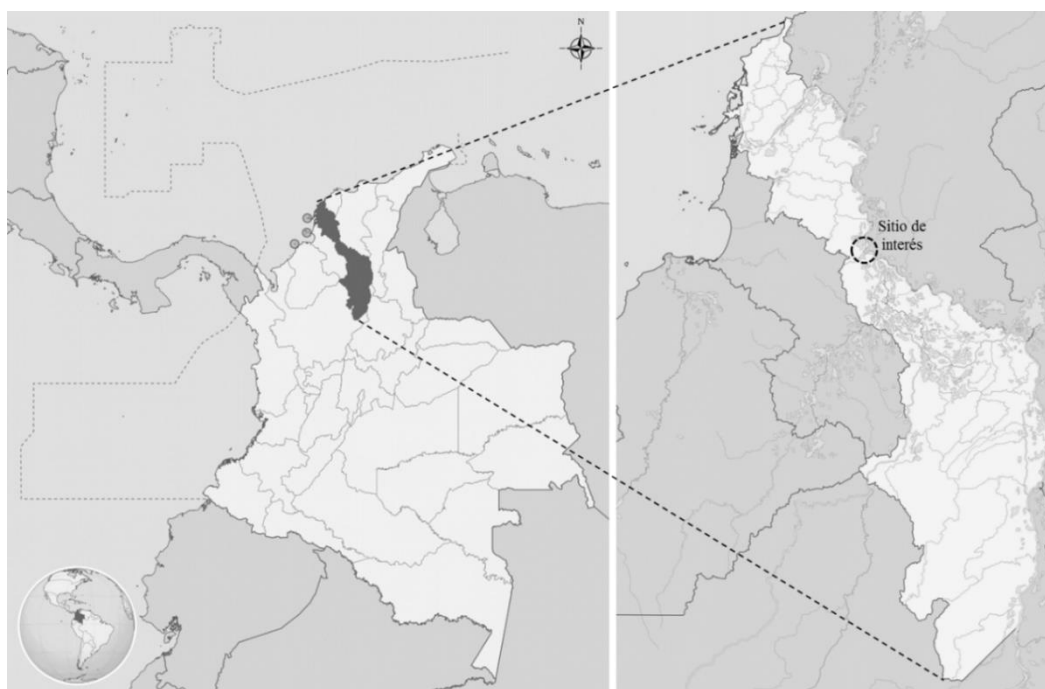
A continuación se presenta una descripción cualitativa de las características del territorio y de los cambios morfológicos evidenciados del meandro de Tacamocho, así como las alternativas evaluadas para mitigar el riesgo por inundación y por erosión que presenta la población en la actualidad, seleccionando finalmente la alternativa que se consideró como la más viable.

## OBJETIVO

Presentar una descripción cualitativa de los cambios morfológicos ocurridos en la zona donde se localiza la población de Tacamocho y las intervenciones contempladas para mitigar el riesgo por inundación y erosión.

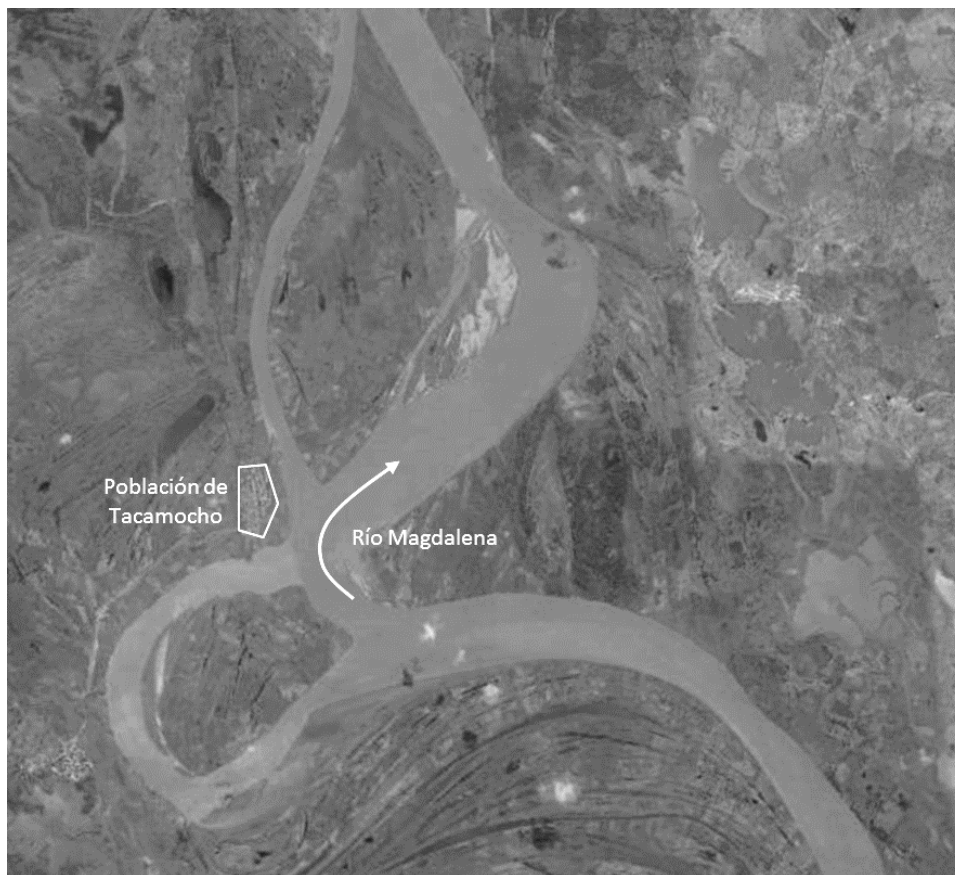
## CONTEXTO POBLACIÓN DE TACAMOCHO

Tacamocho es una población localizada en el departamento de Bolívar, al norte de Colombia, tal como se aprecia en la Figura 1.



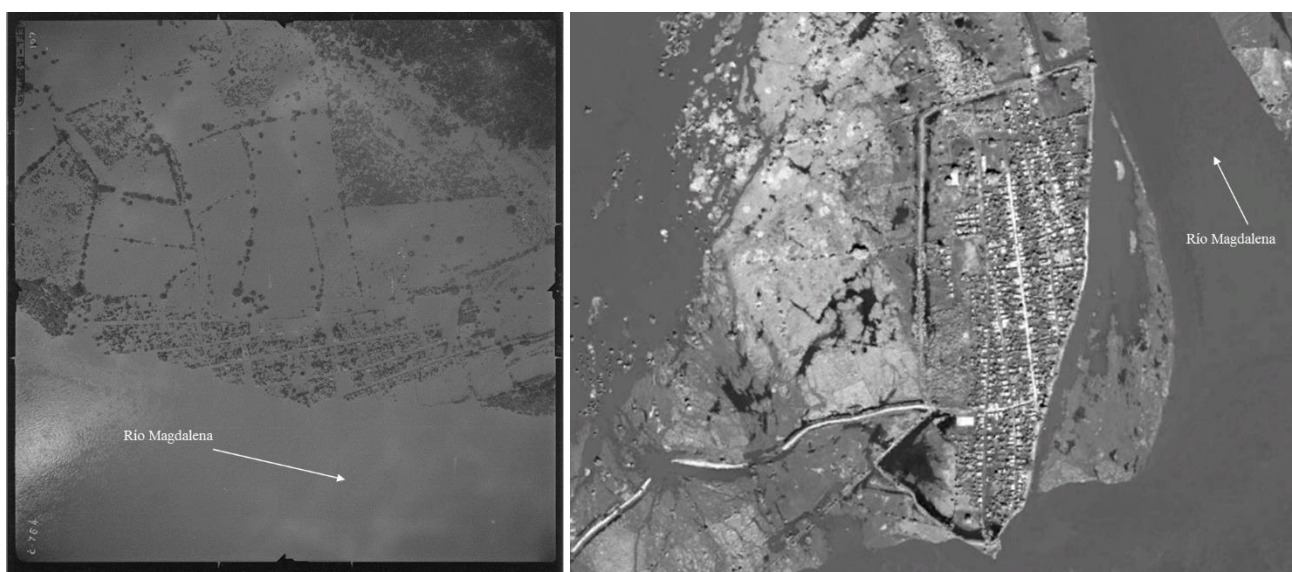
**Figura 1.-** Localización población de Tacamocho (Shadowxfox/Location Maps)

Esta población está asentada sobre la margen izquierda del río Magdalena aguas abajo de un meandro, en una zona inundable y de alta dinámica fluvial, tal como se muestra en la Figura 2.



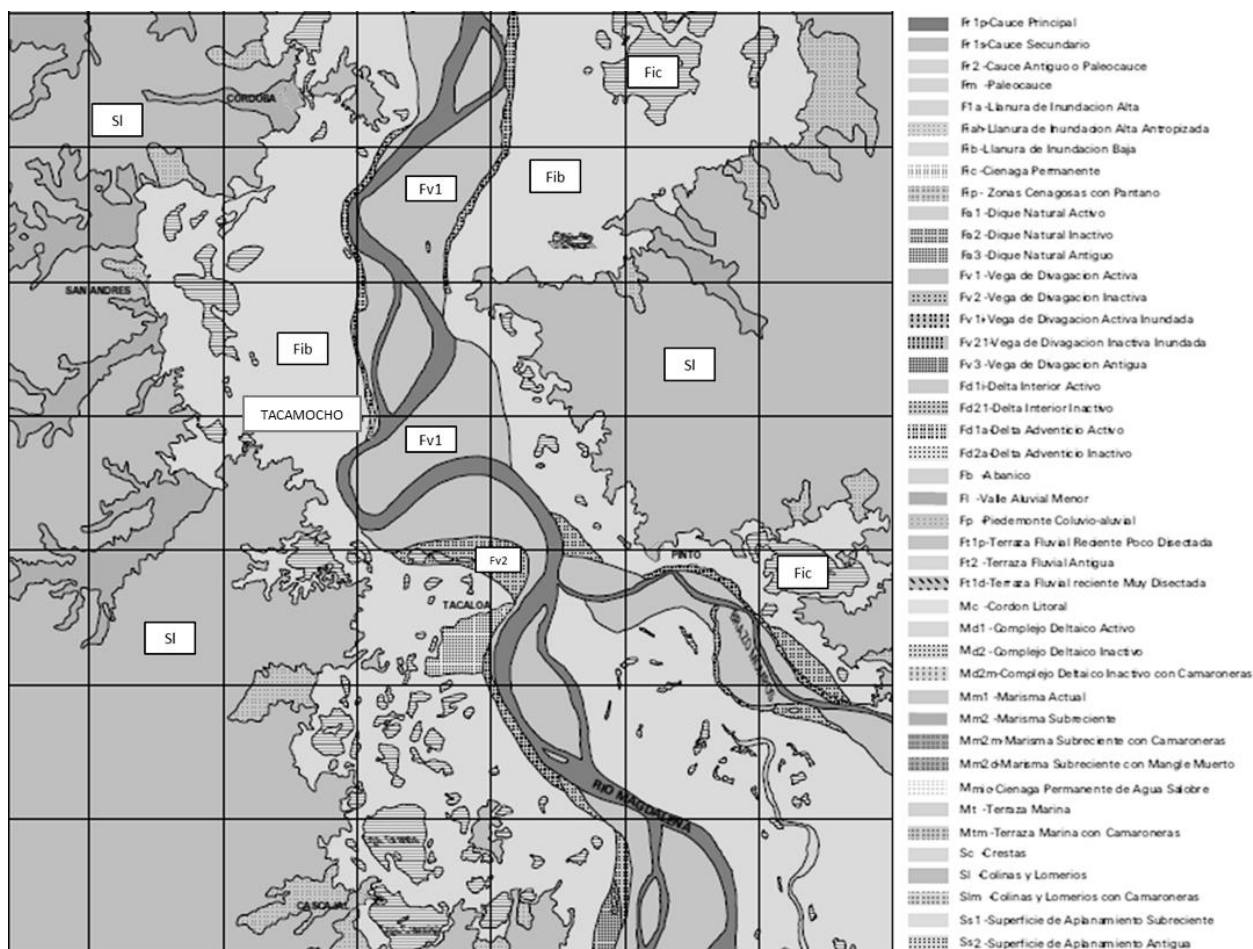
**Figura 2.-** Localización población de Tacamocho en relación con el río Magdalena (Google Earth 2012)

Tacamocho a lo largo de los años se ha visto afectado por inundaciones recurrentes que han ocasionado unos perjuicios importantes para los pobladores del lugar, tanto en términos económicos como en términos de disminución de su calidad de vida. En la Figura 3 se muestran dos imágenes de diferentes épocas, que evidencian la condición de inundación en la zona para los años 1955 y 2012.



**Figura 3.-** Inundaciones en la población en diferentes años (Izquierda: Fotografía aérea IGAC 1955; Derecha: Imagen satelital Google Earth 2012)

Se puede apreciar en la Figura 4, la unidad geomorfológica correspondiente al cauce principal y la localización de Tacamocho con respecto a dicha unidad. Igualmente, se muestra que la población se localiza en el límite de la vega de divagación (Fv), que corresponde a una franja estrecha y discontinua de sedimentación aluvial, cuya forma es plano cóncavo y está compuesta por arenas, limos, y arcillas, asociadas con los desbordamientos del cauce principal. Más específicamente, Tacamocho se encuentra en la vega de divagación activa (Fv1), la cual es la vega asociada con el actual curso del río de reciente configuración y que está en permanente actividad, debido a los procesos de erosión y acumulación que actúan en forma activa. Así mismo, se localiza dentro de la llanura de inundación baja (Fib), la cual es la parte de la llanura de inundación donde el deficiente drenaje permite una mayor permanencia de las áreas inundadas, con procesos de encharcamiento más severos que limitan su uso. Esta unidad está asociada con zonas de ciénagas que se amplían en las épocas de avenidas, actuando en conjunto como zonas amortiguadoras de los excesos de aguas estacionales, según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.



**Figura 4.-** Geomorfología zona de interés (IDEAM, 2001)

Realizando un análisis de dinámica fluvial multitemporal, se puede evidenciar como la zona es muy dinámica con cambios en el cauce en forma significativa, moviéndose dentro de la franja de paleocauces e incluso abarcando la zona de inundación alta (Figura 5). Esta situación lleva a considerar que existe una amenaza alta por efectos erosivos asociados a grandes desplazamientos laterales del cauce.

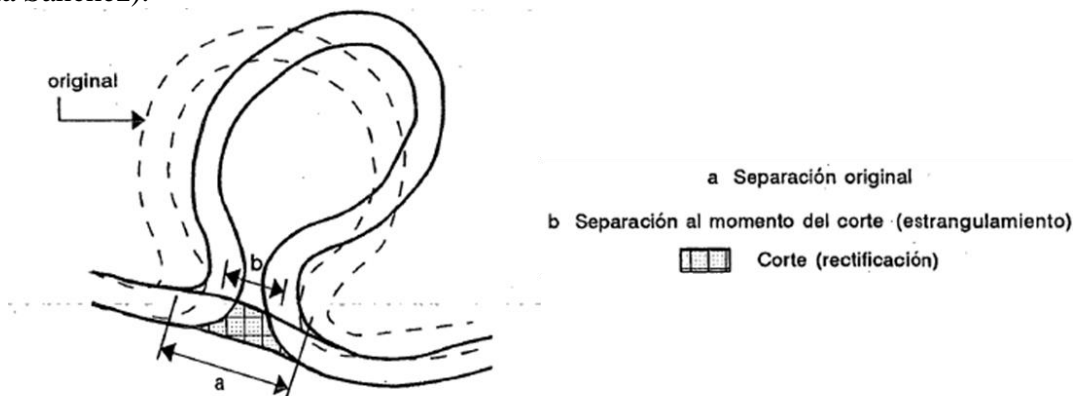
Es posible ver como, en todo momento, hay una incidencia permanente del flujo sobre la población, en ocasiones en forma tangencial por el frente más largo del pueblo, desde 1948 a 1981, y luego por la parte posterior cuando, incluso, se afectó la vía que la comunica con la población de Tacamocho.



**Figura 5.-** Morfodinámica del sector de Tacamocho (Imagen fondo Google Earth)

## EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DEL MEANDRO DE TACAMOCHO

En un meandro, la evolución de las curvas aumenta la longitud del río, pero debido a la erosión de las márgenes exteriores de las curvas, se produce un acercamiento entre las márgenes cóncavas hasta que ocurre un estrangulamiento y éste se corta tal como se aprecia en la Figura 6 (Maza Álvarez & Gracia Sánchez).

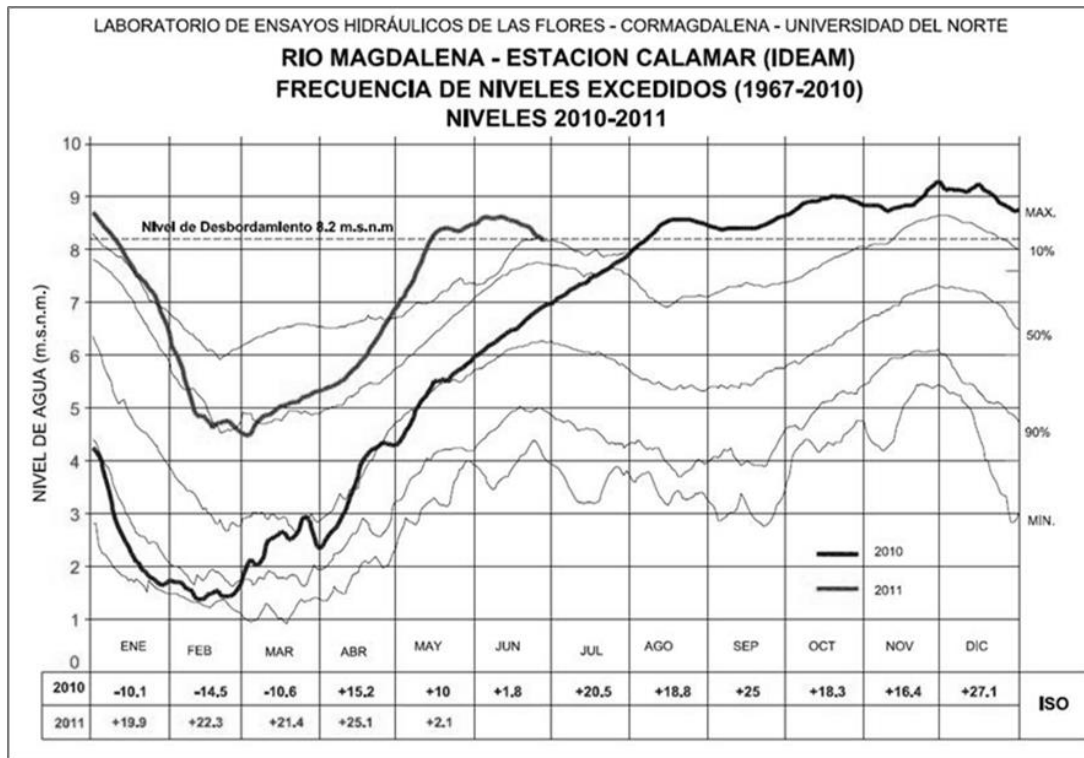


**Figura 6.-** Corte (estrangulamiento) de un meandro (Maza Álvarez & Gracia Sánchez)

Tal como lo describe (García-Hidalgo, 2015), “el meandro está compuesto por dos arcos sucesivos unidos por un tramo recto y corto, donde la circulación del agua adquiere un marcado carácter helicoidal, erosiona el lado externo de un arco y deposita el sedimento en la cara interna del siguiente, lo que origina el crecimiento de barras en forma de media luna (point bars). La dinámica erosiva provoca el estrangulamiento o corte del meandro, recuperando el río un trazado más corto entre las dos crestas, dando lugar al meandro abandonado”.

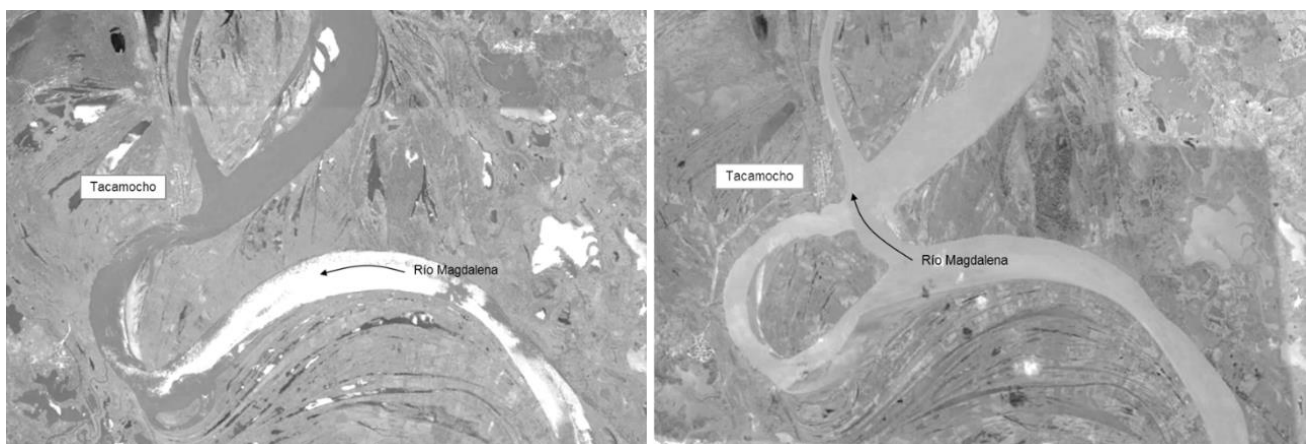
En el año 2011 se produjo el corte del meandro de Tacamocho, el cual ocurrió durante la ola invernal 2010 – 2011, periodo que se presentó como una anomalía marcada respecto a los periodos invernales normales, con precipitaciones e inundaciones muy superiores a las observadas históricamente, siendo un evento totalmente anormal que afectó gran parte del país (Cepal, 2012).

Entre los meses de agosto de 2010 y enero de 2011, se presentaron niveles máximos por encima del nivel de desbordamiento en varias estaciones hidrométricas localizadas sobre el río Magdalena. Tal es el caso de la estación Calamar, situada unos kilómetros aguas abajo de Tacamocho, como se puede apreciar en la Figura 7, donde el comportamiento de los niveles fue en aumento hasta sobrepasar el nivel de desbordamiento en el lugar.



**Figura 7.-** Comportamiento de los niveles en la estación Calamar

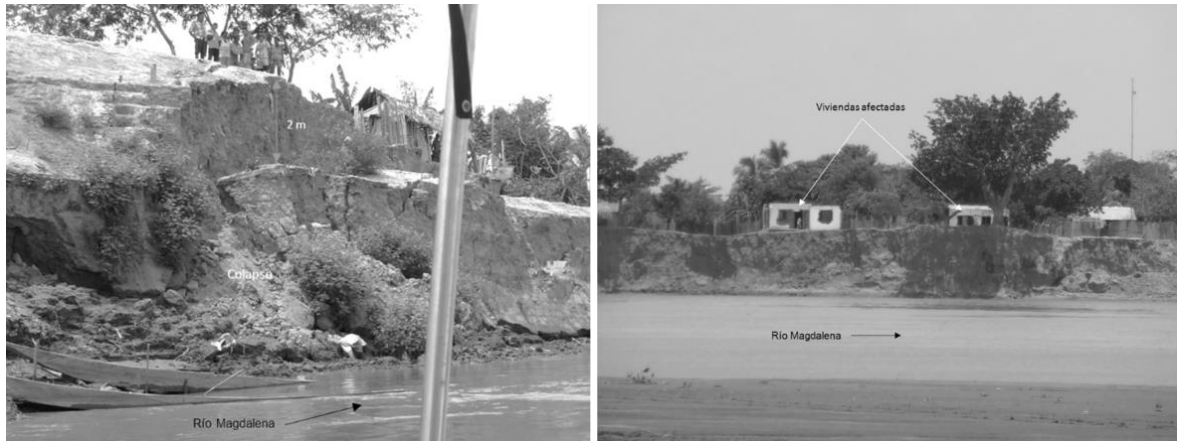
Dicho corte se realizó mediante un mecanismo diferente al descrito en la Figura 6, que hemos llamado, por lavado superficial, es decir, que por encima del cuello del meandro circuló un caudal durante un tiempo suficiente (ver Figura 8) para generar cárcavas superficiales hasta llegar a labrar un canal amplio y profundo con una buena capacidad de descarga. Este canal evolucionó tanto que se generó el corte, cambiando la morfología del cauce, con cambios que se muestran en la Figura 8.



**Figura 8.-** Cambios morfológicos del río Magdalena (Izquierda: Google Earth 2009 – Derecha: Google Earth 2012)

Los impactos asociados a los cambios morfológicos del meandro corresponden a la incidencia directa del río Magdalena sobre la población, lo cual ha generado unos procesos erosivos de grandes magnitudes sobre la orilla, que han desestabilizado el talud y originado el colapso de varias viviendas, y del dique para el control de inundaciones. Dicha situación puede evidenciarse en la Figura 9.

Mediante trabajos de campo, batimétricos y topográficos, realizados durante el mes de agosto de 2015, fue posible establecer la condición hidrodinámica actual del meandro de Tacamocho y su incidencia en la población, tal como se presenta en la Figura 10. Se realizaron modelaciones matemáticas mediante el software de libre acceso IBER. Puede apreciarse que frente a la población se presentan calados superiores a 21 metros, es decir, el flujo se encuentra transitando recostado sobre la margen izquierda del Río, generando cuencos de socavación muy concentrados que desestabilizan considerablemente la pata del talud, el cual, según exploraciones geotécnicas, se encuentra conformado por arenas mal gradadas.



**Figura 9.-** Condición actual de la orilla donde se localiza Tacamocho



**Figura 10.-** Condición hidrodinámica sector de estudio

## ACCIONES PROPUESTAS DE MITIGACIÓN

Debido a la afectación recurrente que se presenta en Tacamocho, fue necesario establecer posibles medidas de mitigación para la población.

Se tuvieron en cuenta cinco alternativas de intervención, que contemplaran integralmente tanto medidas para el control de las inundaciones como para el control de los procesos erosivos sobre el talud, las cuales se describen a continuación.

### **Alternativa 1. Espolones en tubería metálica confinando bolsacretos**

El objetivo de este tipo de estructuras es impactar sobre el flujo, buscando alejar las líneas de corriente de la orilla. Con este tipo de intervención se conforman estructuras que interfieren directamente con el flujo en sitios muy específicos.

Si bien el campo de espolones puede ayudar a proteger la orilla, esto podría afectar las condiciones de navegabilidad del canal, además, por los cambios morfológicos que viene presentando el cauce en su nuevo proceso de estabilización una vez cortado el meandro, el sitio de la incidencia de la corriente puede cambiar, desvirtuando la presencia de las estructuras y haciendo necesario proteger mediante tablestacados metálicos, la zona donde incidiría el flujo bajo la nueva condición.

Las obras para el control de inundaciones corresponden a la reconstrucción de los diques afectados, y en los sitios en donde se perdieron por retroceso de la orilla, sería necesario aislar una franja lo suficientemente amplia para la construcción de unos nuevos, siendo necesario reubicar un número importante de viviendas.

### ***Alternativa 2. Tablestacado metálico***

Son estructuras verticales de alto costo cuyo fin primordial es constituir una terraza que además sirva como muelle. Se requiere de cimentaciones de gran profundidad ya que su presencia induce a erosiones severas en la base.

Para el casco urbano de Tacamocho, se tendría que implementar una estructura muy alta, debido a que las profundidades que se presentan actualmente superan los 20 metros en la zona donde se presenta un cuenco de socavación muy concentrado frente a la población.

Además de ser una alternativa muy costosa, para el caso específico de Tacamocho, que presenta unos suelos a la profundidad de cimentación conformado por arenas, al tener que hincar la tablestaca a más de 40 metros, el suelo se densificaría de tal manera que dificultaría su hincado.

Las obras para el control de inundación corresponden a la construcción de unos diques tal como se mencionó en la alternativa 1.

### ***Alternativa 3. Espolones y protección marginal en roca***

Teniendo en cuenta las características geotécnicas del suelo, la evidencia de la magnitud de las erosiones y las condiciones hidráulicas, entonces resulta que una de las tipologías de obras más conveniente es la de conformar unos espolones con enrocados sueltos.

Al igual que la alternativa 1, es necesario contemplar, además de los espolones, una protección marginal o longitudinal para proteger a la población de la posible incidencia del río Magdalena por detrás de la población, la cual se contempla como una protección marginal en roca suelta.

De la misma forma que las alternativas anteriores, es necesario contemplar, además de las obras para el control de erosión, obras para el control de inundación.

### ***Alternativa 4. Corta del meandro***

Uno de los aspectos importantes en la corta del meandro ocurrida durante los eventos extraordinarios de crecientes durante el periodo invernal 2010-2011, fue que dicho fenómeno se realizó por el desborde y flujo permanente por encima del meandro, pero este no había evolucionado lo suficiente para que se produjera la corta por contacto de las dos orillas erosionadas, razón por la cual el meandro no quedó lo suficientemente corto para que continuara su retracción, sino que comenzó a evolucionar alargándose nuevamente en dirección a Tacamocho.

Bajo esta consideración la alternativa que se plateó fue la de hacer una corta más al interior del meandro con la intención de que el río se desvíe y se aleje del poblado.

Para determinar la altura mínima requerida del canal para que cuente con un caudal permanente, se acudió al espectro de profundidades (Figura 10), encontrando que la profundidad actual está por el orden de 14 metros en la entrada del canal, por lo cual esta es la profundidad que se adoptó para esta alternativa. Este tipo de intervenciones tienen un alto grado de incertidumbre.

Al igual que las alternativas anteriores, es necesario contemplar obras para el control de inundación.

### ***Alternativa 5. Reubicación***

A partir de los análisis de las posibles medidas estructurales para mitigar el riesgo, que resultan desproporcionadas frente a la magnitud de la pérdida de bienes, se planteó una solución de mayores



alcances en seguridad como es la reubicación del centro poblado en un lugar por fuera de la zona de divagación, con lo cual se evitarían los problemas de erosión e inundación, y más aún, con esto se conseguiría, bajo un nuevo modelo de urbanismo, brindar mejor asistencia en servicios básicos y complementarios mejorando ostensiblemente la calidad de vida de todos los pobladores.

## COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS

En primer lugar, se realiza una comparación porcentual de los costos asociados a cada una de las alternativas, teniendo como referencia el menor de los costos estimados. Se establece que la alternativa más económica corresponde a la reubicación de la población. En la Tabla 1 se presentan los porcentajes superiores a la alternativa de referencia, siendo los espolones y protección marginal en roca un 471% más costoso que la reubicación.

**Tabla 1.-** Comparación costos alternativas

Alternativa	%
Espolones en tubería metálica confinando bolsacretos	135
Tablestacado metálico	310
Espolones y protección marginal en roca	571
Corta del meandro	269
Reubicación	100

Para darle un valor ponderado al costo de las diferentes alternativas y darle una calificación de costo bajo, medio y alto, se determinó el rango de variación como la diferencia entre el menor y el mayor costo y dicho rango se dividió en tres, cuyo resultado es el rango para cada intervalo.

Adicionalmente al costo, con base en cinco criterios de análisis como son complejidad en la construcción, confiabilidad estructural, eficacia, impacto morfológico y valor socioeconómico agregado de las obras, se evaluaron las alternativas según sus características, sus ventajas y desventajas, con el fin de establecer su viabilidad como alta, media o baja.

El resultado de determinar el valor de evaluación de cada criterio y de cada alternativa, se presenta en la Tabla 2. Finalmente, el valor numérico que se le asignó a cada alternativa, correspondió a la sumatoria de la asignación de valores de los seis criterios analizados, para que posteriormente se definiera la viabilidad de las obras propuestas.

Puede apreciarse que las alternativas 1, 2 y 4 tienen una viabilidad baja, mientras que la alternativa 3 cuenta con una viabilidad media. Por el contrario, la alternativa 5, cuenta con una viabilidad alta y es la que finalmente se recomienda.

**Tabla 2.-** Evaluación de alternativas

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS								
ALTERNATIVA	COSTO	COMPLEJIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN	CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL	EFICACIA	IMPACTO MORFOLÓGICO	VALOR SOCIOECONÓMICO AGREGADO	VALOR	VIABILIDAD
1	BAJO	ALTA	BAJA	MEDIA	ALTO	NULO	12	BAJA
2	MEDIO	ALTA	BAJA	MEDIA	BAJO	NULO	14	BAJA
3	ALTO	MEDIA	ALTA	ALTA	ALTO	NULO	16	MEDIA
4	MEDIO	ALTA	BAJA	BAJA	ALTO	NULO	8	BAJA
5	BAJO	BAJA	ALTA	ALTA	NULO	ALTO	30	ALTA

## CONCLUSIONES

A partir del fenómeno de la Niña 2010 – 2011, las condiciones sedimentológicas y morfológicas de la zona donde se localiza Tacamocho cambiaron drásticamente con la corta del meandro aguas arriba de la población, lo cual ocasionó que la corriente incidiera directamente sobre la orilla del centro poblado y generara unos procesos erosivos muy severos, que produjeron el retroceso de la misma perdiéndose el dique de control y de paso el derribamiento de un número importante de viviendas. Dichos procesos erosivos han continuado, afectando más viviendas y calles provocando desplazamiento de la población.

El análisis de morfodinámica permitió establecer que la población de Tacamocho se encuentra localizada en la zona de divagación y dinámica más activa del río Magdalena, es decir, en la mitad del río, quedando sometida recurrentemente a fenómenos de inundación, y bajo la amenaza de procesos erosivos severos la mayor parte del tiempo.

Se resalta que los cambios morfológicos dados en la zona donde se localiza Tacamocho se presentaron debido al corte del meandro del río Magdalena, el cual no tuvo un mecanismo de estrangulamiento por contacto de las dos orillas cóncavas, como suele suceder en la mayoría de los meandros, sino por el mecanismo de lavado de material sobre el cuello del mismo.

Los caudales que generan que la corriente y las mayores velocidades incidan donde se localiza la población de Tacamocho son los bajos, pues transitan concentrados sobre esta margen y además, son los más recurrentes y que se presentan con mayor tiempo de duración, lo cual implica que durante largos periodos durante el año, el talud se vea afectado por los procesos erosivos.

En síntesis se ha establecido que las amenazas por erosión e inundación son permanentes y de gran impacto, mientras que el territorio es muy vulnerable a estas amenazas. A partir de esta consideración, se plantearon diferentes tipos de intervenciones para mitigar el riesgo.

Como conclusión final, a partir de un análisis comparativo, se considera que la mejor alternativa es la reubicación de la población de Tacamocho fuera de la zona de divagación y dinámica del río Magdalena, con el fin de poner a la población por fuera de las amenazas naturales de erosión e inundación, pues cualquier intervención bajo las condiciones morfodinámicas e hidráulicas actuales o futuras, cuenta con una gran incertidumbre. Adicionalmente, la reubicación daría paso a mejorar ostensiblemente la calidad de vida de los pobladores.

## REFERENCIAS

- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vásquez-Cendón, M., . . . Coll, A.** (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol.30(1) pp.1-10.
- Cepal, C. E.** (2012). *Valoración de daños y pérdidas. Ola invernal en Colombia, 2010 - 2011*. Bogotá D.C.: Misión BID - Cepal.
- García-Hidalgo, J.** (29 de Noviembre de 2015). *Página de José F. García-Hidalgo*. Obtenido de [http://www3.uah.es/jose\\_f\\_garcia\\_hidalgo/PIDs/pid11.html](http://www3.uah.es/jose_f_garcia_hidalgo/PIDs/pid11.html)
- IDEAM.** (2001). *Geomorfología y susceptibilidad a la inundación del valle fluvial del río Magdalena sector Barrancabermeja - Bocas de Ceniza*. Bogotá D.C.: IDEAM.
- Martín Vide, J.** (2002). *Ingeniería de ríos*. España: Ediciones UPC.
- Maza Álvarez, J., & Gracia Sánchez, J.** (s.f.). *Morfología de Ríos*. Ciudad de México: UNAM.