

Universidad Nacional Experimental
de los Llanos Occidentales
“EZEQUIEL ZAMORA”



LA UNIVERSIDAD QUE SIEMBRA

VICERRECTORADO
DE INFRAESTRUCTURA Y PROCESOS INDUSTRIALES
ESTADO COJEDES

COORDINACIÓN
ÁREA DE POSTGRADO

**DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ESTABLES DEL RÍO
TINACO, EN EL TRAMO “EL TOPO – PUENTE LA CAÑITA”,
EMPLEANDO TEORIA DE REGIMEN**

Autor: Héctor Esqueda
Tutor: Luis Henríquez Rumbo Mendoza

SAN CARLOS, ABRIL DE 2018

Universidad Nacional Experimental
de los Llanos Occidentales
“EZEQUIEL ZAMORA”



La Universidad que siembra

Vicerrectorado de Infraestructura
y Procesos Industriales
Coordinación de Área de Postgrado
Postgrado en Ingeniería Ambiental

**DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ESTABLES DEL RÍO
TINACO, EN EL TRAMO “EL TOPO – PUENTE LA CAÑITA”,
EMPLEANDO TEORIA DE REGIMEN**

Requisito parcial para optar al grado de

Magister Scientiarum

AUTOR: Héctor Esqueda

C.I. N° V-15.627.274

TUTOR: Luis Henríquez Rumbo Mendoza

SAN CARLOS, ABRIL DE 2018

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo, Luis Henríquez Rumbo Mendoza, titular de la Cédula de Identidad N° V-10.323.199, en mi carácter de tutor del Trabajo de Grado titulado **DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERISTICAS ESTABLES DEL RÍO TINACO, EN EL TRAMO “EL TOPO – PUENTE LA CAÑITA”, EMPLEANDO TEORIA DE REGIMEN**, presentado por Héctor Esqueda, titular de la Cédula de Identidad N° V- 15.627.274, como requisito para optar al título de *Magister Scientiarum* en Ingeniería Ambiental por la Universidad Nacional Experimental de los Llanos Ezequiel Zamora (UNELLEZ), por medio del presente certifico que he leído el Trabajo y considero que reúne las condiciones necesarias para ser defendido y evaluado por el jurado examinador que se designe.

En la ciudad de San Carlos, estado Cojedes, a los veinticuatro días del mes de abril de dos mil dieciocho.

Mag. Luis Henríquez Rumbo Mendoza
CI N° V- 10.323.199
TUTOR

AGRADECIMIENTO

A Dios nuestro señor por la oportunidad que he tenido de aprender, mejorar y de crecer junto a personas tan especiales para mí, y que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio. Por darme la oportunidad de vivir, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente, además de su infinita bondad y amor.

A mis padres con todo mi cariño y mi amor, ya que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba, por su valioso apoyo en todo momento desde el inicio de mis estudios de maestría. A ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento.

A mi Profesor Guía y Tutor; MSc. Luis Rumbo, por su amistad, paciencia y su constante apoyo durante el desarrollo de este Trabajo de Grado.

De igual forma deseo expresar mi agradecimiento a la UNELLEZ (pregrado y postgrado), por darme la oportunidad de realizar los estudios de Maestría, y contar con su apoyo en todo momento.

A los profesores de Postgrado, y compañeros de trabajo, por sus aportes académicos y amistosos; a todo lo largo de ésta Maestría; amigos por siempre.

A todos ellos gracias. Con mucho cariño, humildemente

Héctor Esqueda

INDICE	Pág.
LISTA DE TABLAS y FIGURAS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I	3
EL PROBLEMA	3
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2. IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
CAPÍTULO II	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1. Antecedentes de la investigación	6
2.1.1. A nivel internacional	6
2.1.2. A nivel nacional	9
2.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	10
2.2.1. Arrastre en la capa de fondo	10
2.2.2. Estabilidad de cauces	10
2.2.3. Grados de libertad	11
2.2.4. Escurrimiento con un grado de libertad	11
2.2.5. Escurrimiento con dos grados de libertad	12
2.2.6. Escurrimiento con tres grados de libertad	13
2.2.7. Escurrimiento con cuatro grados de libertad	13
2.2.8. Teoría de régimen	14
2.2.8.1. Método de Lacey	15
2.2.8.2. Método de Blench	16
2.2.8.3. Método de Simons y Albertson	18
2.2.8.4. Método de Kondap	19

CAPÍTULO III	21
MARCO METODOLÓGICO	21
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	21
3.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN	21
3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	21
3.4. UNIDAD DE ESTUDIO	21
3.5. FASES DE LA INVESTIGACIÓN	21
3.5.1. Descripción de las principales características morfométricas y fluviales del río Tinaco en el tramo comprendido desde el sector el Topo hasta el puente La Cañita	21
3.5.2. Estimación de la capacidad de transporte de sedimentos del río Tinaco, en el tramo comprendido desde el sector El Topo hasta el puente La Cañita empleando modelos empíricos	22
3.5.3. Estudio de los principales métodos que permiten conocer las características estables de un cauce aluvial, caso de estudio río Tinaco en el tramo comprendido desde el sector El Topo hasta el puente La Cañita, empleando teoría de régimen, apoyada en los métodos de Lacey, Blench, Simons -Albertson y Kondap; y su comparación con condiciones reales medidas en campo	24
CAPÍTULO IV	26
DESCRIPCIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	26
4.1. PRINCIPALES PARÁMETROS MORFOLÓGICOS Y FLUVIALES DEL RÍO TINACO EN EL TRAMO COMPRENDIDO DEL SECTOR EL TOPO HASTA EL PUENTE LA CAÑITA	26
4.1.1. Principales características de los sedimentos de fondo, parámetros hidráulicos y fluviales del tramo estudiado	26
4.1.2. Clasificación del río Tinaco en el tramo estudiado	31
4.1.3. Estimación de la capacidad de transporte de sedimentos en un tramo del río Tinaco empleando modelos empíricos	32
4.1.4. Estudio de las principales características estables del río Tinaco en el	32

tramo comprendido desde el sector El Topo hasta el puente La Cañita, empleando teoría de régimen, apoyada en los métodos de Lacey, Blench, Simons - Albertson y Kondap

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓN	37
CONCLUSIONES	37
RECOMENDACIÓN	39
REFERENCIAS	40

LISTA DE TABLAS y FIGURAS

TABLAS	Pág
1. Valores de los coeficientes del método de Simons y Albertson	19
2. Diámetros característicos de una muestra del lecho, Planta de tratamiento nueva (Hidrocentro)	26
3. Diámetros característicos de una muestra del lecho, Planta de tratamiento vieja (Hidrocentro)	27
4. Diámetros característicos de una muestra del lecho, Aguas arriba del Puente La Cañita	28
5. Diámetros característicos de una muestra del lecho, Aguas abajo del Puente La Cañita	29
6. Diámetros característicos de una muestra del lecho, Tinaco, entrada a El Topo	30
7. Categorías del Índice de sinuosidad	32
8. Capacidad de transporte de sedimentos en un tramo del río Tinaco	32
9. Resumen de los parámetros obtenidos de la aplicación de cada método (Teoría de régimen)	36
FIGURAS	Pág
1. Río con un grado de libertad, cambio del tirante	12
2. Río con dos grados de libertad; pendiente, tirante	12
3. Río con tres grados de libertad; pendiente, tirante y ancho	13
4. Río Coatzacoalcos en la zona intermedia, meandros abandonados, cuatro grados de libertad	14

UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL
DE LOS LLANOS OCCIDENTALES EZEQUIEL ZAMORA
VICERRECTORADO DE INFRAESTRUCTURA Y PROCESOS INDUSTRIALES
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERIA AMBIENTAL

**DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ESTABLES DEL RÍO
TINACO, EN EL TRAMO “EL TOPO – PUENTE LA CAÑITA”,
EMPLEANDO TEORIA DE REGIMEN**

AUTOR: Héctor Esqueda

TUTOR: Luis Henríquez Rumbo Mendoza

AÑO: 2018

RESUMEN

Las aproximaciones geomórficas para describir y explicar la forma de equilibrio de un cauce fluvial y los métodos propuestos para el diseño de cauces de régimen estable han contado siempre con ecuaciones simples que relacionan las dimensiones del cauce con el tipo de sedimento, pendiente y caudal. Estas ecuaciones son ecuaciones empíricas de geometría hidráulica, obtenidas a partir del análisis de regresión de variables relevantes muestreadas en cursos de agua naturales o ecuaciones racionales de régimen derivadas a partir de la teoría física sobre hidráulica y transporte de sedimentos. En este trabajo se aplicó la teoría de régimen, apoyada en los métodos de Lacey, Blench, Simons – Albertson y Kondap, para estudiar las características estables del río Tinaco en el tramo El Topo – Puente La Cañita. No se realizó validación ni calibración de las ecuaciones empleadas. Los principales resultados que se reportan son: el método de Lacey arroja un ancho superficial $B= 6,5422$ m, un tirante medio $dm= 0,3553$ m, una pendiente hidráulica $S= 0,0034$ y un coeficiente de rugosidad de maninng $n = 0,0275$; en el método de Blench los valores de los principales parámetros son $B= 20,58$ m, $dm= 0,16$ m, $S= 0,00099$ y $n= 0,016$; con respecto al método de Simons-Albertsons se tienen los valores de $B= 4,116$ m, $dm= 0,454$ m, $S= 0,00005$ y $n= 0,0027$; por último se presentan los valores arrojados por el método de Kondap $B= 4,726$ m, $dm= 0,444$ m, $S= 0,0033$ y $n= 0,037$. Las teorías de régimen y, en general, de ajuste dinámico a los cauces están principalmente basadas en relaciones empíricas entre variables dependientes referidas a la geometría hidráulica y variables independientes definidas por las condiciones de la corriente y transporte de sedimentos. La teoría de régimen incluye a la vez supuestos espaciales y temporales.

Palabras clave: *cauce fluvial, transporte de sedimento, teoría de régimen, río Tinaco.*

UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL
DE LOS LLANOS OCCIDENTALES EZEQUIEL ZAMORA
VICERRECTORADO DE INFRAESTRUCTURA Y PROCESOS INDUSTRIALES
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERIA AMBIENTAL

**DETERMINATION OF THE STABLE CHARACTERISTICS OF THE RIVER
TINACO, IN THE SECTION "EL TOPO - PUENTE LA CAÑITA",
EMPLOYING THEORY OF REGIME**

AUTOR: Héctor Esqueda

TUTOR: Luis Henríquez Rumbo Mendoza

AÑO: 2018

ABSTRACT

The geomorphic approaches to describe and explain the equilibrium form of a riverbed and the proposed methods for the design of steady riverbeds have always had simple equations that relate the dimensions of the channel to the type of sediment, slope and flow. These equations are empirical equations of hydraulic geometry, obtained from the regression analysis of relevant variables sampled in natural water courses or rational equations of regime derived from the physical theory on hydraulics and sediment transport. In this work the regime theory was applied, supported by the methods of Lacey, Blench, Simons - Albertson and Kondap, to study the stable characteristics of the Tinaco River in the El Topo - Puente La Cañita section. No validation or calibration of the equations used was performed. The main results reported are: the Lacey method yields a surface width $B = 6.5422$ m, an average tie $dm = 0.3553$ m, a hydraulic slope $S = 0.0034$ and a roughness coefficient of maninng $n = 0.0275$; In the Blench method the values of the main parameters are $B = 20.58$ m, $dm = 0.16$ m, $S = 0.00099$ and $n = 0.016$; With respect to the Simons-Albertsons method we have the values of $B = 4.116$ m, $dm = 0.454$ m, $S = 0.00005$ and $n = 0.0027$; Finally, the values of Kondap $B = 4,726$ m, $dm = 0,444$ m, $S = 0,0033$ and $n = 0,037$ are presented. Theories of regime and, in general, dynamic adjustment to the channels are mainly based on empirical relationships between dependent variables referring to hydraulic geometry and independent variables defined by current conditions and sediment transport. Scheme theory includes both spatial and temporal assumptions.

Keywords: *river channel, sediment transport, regime theory, Tinaco river.*

INTRODUCCIÓN

Los ríos, cualquiera sea el tamaño de su cuenca, aprecian cambios constantes en su forma y en las dimensiones de sus parámetros más importantes, pues componen sistemas muy dinámicos controlados por el régimen hidrológico y las características del transporte de sedimentos (Garde, 2006).

Tales cambios son a veces innatos al propio sistema, cuando la cuenca está dominada por procesos geomorfológicos muy activos, capaces de aportar al cauce grandes cantidades de materiales gruesos (*Ibidem*). En tal sentido, la morfología del cauce se ajusta a largo, mediano y corto plazo a los cambios de caudales y sedimentos, manteniendo un equilibrio dinámico acorde con las condiciones impuestas por el cambio ambiental. Aunque Rocha (1998) argumenta que los cauces naturales rara vez alcanzan un perfecto estado de equilibrio, debido a que no sólo varían las características hidrodinámicas de las corrientes, sino también los procesos y unidades geomorfológicas, los aportes sedimentarios de sus afluentes, e incluso la forma y tamaño de los depósitos del lecho, añade que el resultado de este cambio es una variación análoga con la morfología global del cauce, pero al cabo de varios años, los efectos de excavado y relleno se compensan para mantener la estabilidad.

En el mismo orden de ideas, Garde (2006) también admite que los cambios en el comportamiento de sistemas de distribución fluvial son una respuesta a las variables de descarga y tasa de distribución de sedimentos. Sin embargo, las actividades humanas pueden modificar potencialmente los cambios (Ojeda, 2007).

En tal sentido, Rivera y otros, (2013) argumenta que los ríos se comportan de maneras muy diversas y con el tiempo van sufriendo cambios en la búsqueda de la estabilidad hidráulica. Estos cambios se deben a dos factores principales, los primeros asociados con fenómenos naturales y los segundos por causas antropogénicas. La importancia de la exploración o conocimiento de los cauces es de gran beneficio, pues sobre todo en eventos extremos posibilita la prevención o reducción de daños en los ámbitos económicos y de infraestructura, pero de manera principal, cuando se trata de vidas humanas.

Al respecto, Maza y García (1996), indican que los cauces por naturaleza propia tienden al equilibrio por medio del ajuste de ciertos parámetros, entre los que se encuentran: el caudal, la pendiente longitudinal, el transporte de sedimentos, la resistencia al flujo, la estabilidad de las márgenes y del fondo, la vegetación, la temperatura, la geología y las actividades humanas. Cabe resaltar que en la mayoría de los casos son más importantes las interrelaciones entre factores que la influencia de cada uno de ellos por separado. Un ejemplo de lo anterior es la interrelación entre la pendiente longitudinal, la carga de sedimento y la resistencia de las márgenes y del fondo al movimiento, ya que están estrechamente ligadas entre sí.

La investigación estuvo centrada en estudiar los principales métodos que permiten conocer las características estables de un cauce aluvial, caso de estudio río Tinaco en el tramo comprendido desde el sector El Topo hasta el puente La Cañita, empleando teoría de régimen, apoyada en los métodos de Lacey, Blench, Simons - Albertson y Kondap; y su comparación con condiciones reales medidas en campo.

Este documento se estructura de la siguiente manera: el Capítulo I se centra en el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos de la investigación; el Capítulo II trata de los antecedentes de la investigación y los fundamentos teóricos; el Capítulo III detalla los aspectos metodológicos; en el Capítulo IV se describe y discuten brevemente los resultados; por último, se presentan las conclusiones.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Ante el hecho de cubrir sus necesidades, el hombre altera el ambiente en diversos grados y formas. La intervención del ser humano, en los ríos, en especial en el ámbito de las estructuras fluviales, tiende a perturbar las condiciones naturales de los cursos de agua (Rivas, 1999).

En tal sentido, los cambios de origen antropogénicos provocan alteraciones en las características naturales de los cursos de agua: la profundidad, la pendiente y el ancho. Ellas representan las principales variables que se requieren conocer para predecir los cambios del río generados al tratar de alcanzar su nueva condición de equilibrio.

Por otro lado, puede afirmarse que el estudio de los fenómenos físicos que se presentan en la actualidad en los ríos, son importantes debido a su impacto en las estructuras civiles, entre otras, las cuales se ven afectadas por dichos fenómenos; claro ejemplo de esto son las captaciones de agua, presas, entre otros, así como las poblaciones cercanas a estas fuentes hídricas, por eso se hace importante el estudio de las características estables de un río bajo el enfoque de la teoría de régimen (Peñalosa y Arias, 2010).

En el mismo orden de ideas, Rocha (2006) afirma que los ríos aluviales son esencialmente móviles, es decir, que las principales características de éste no tienen estabilidad ni permanencia. Se desplazan y modifican más de lo que suele imaginarse. Esta movilidad fluvial representa un peligro para las obras de ingeniería ubicadas sobre el lecho fluvial y en las inmediaciones, las que por naturaleza deben ser estables.

De igual manera afirma, que la estabilidad de cauces basada en la teoría de régimen, estudia las distintas expresiones que permiten estimar las principales características estables de una corriente, de acá se puede inferir el comportamiento futuro de un río.

Los problemas relativos a la estabilidad de cauces constituye un reto permanente para la ingeniería; sin embargo, la comprensión de las variadas formas que adoptan los ríos es indispensable para el estudio de los procesos erosivos y el transporte de sedimentos elementos esenciales para el posterior diseño de las distintas obras que estén en contacto con un río o cerca de él. Con respecto al río Tinaco, es importante mencionar que es una fuente vital de agua potable para la población del municipio Tinaco y zonas vecinas; razones fundamentales que justifican el conocer las principales características estables que definen su geometría hidráulica y por consiguiente su dinámica fluvial.

Tomando en cuenta lo expuesto, surgió la siguiente interrogante de investigación: ¿cuáles serán las principales características estables del río Tinaco en el tramo comprendido desde el sector el Topo hasta el puente la Cañita, apoyado en la teoría de régimen?

1.2. IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

El ámbito de la presente investigación está en línea con múltiples aspectos contenidos en ciertos documentos de carácter legal en Venezuela, los cuales justifican su desarrollo: (1) el artículo 127, de la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela, indica que “es un deber y un derecho de cada generación proteger y mantener el ambiente, para beneficio de ella misma y de las futuras generaciones”, además, “es deber del Estado proteger los procesos ecológicos”, y “manejar eficientemente los recursos agua y suelo”. La información que se generará en este proyecto resultará valiosa para apoyar la toma de decisiones en materia de gestión ambiental por parte del Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas, seccional Cojedes; (2) el quinto objetivo del Segundo Plan Socialista de Desarrollo Económico y Social de la Nación, 2013-2019, da cuenta de “la necesidad de construir un modelo económico productivo ecosocialista, basado en una relación armónica entre el hombre y la naturaleza, que garantice el uso y aprovechamiento racional y óptimo de los recursos naturales, respetando los procesos y ciclos de la naturaleza”, asimismo “convoca a sumar esfuerzos para el impulso de un movimiento de carácter mundial para contener las causas y revertir los efectos del cambio climático”.

Por otro lado la presente investigación, tiene por objeto proveer una metódica para afrontar diferentes problemas referentes a la dinámica de un cauce aluvial, inducida por los manejos inadecuados en la cuenca. La metódica que se aplicó en este estudio, puede ser replicada en otras cauces aluviales del estado Cojedes donde se presuman los mismos problemas; (3) el Ministerio del Poder Popular para la Educación Universitaria, Ciencia y Tecnología, considera relevante el área de Ambiente, en especial, si ésta se vincula estrechamente al componente social. Nótese que este proyecto de investigación promueve indirectamente una vinculación social significativa entre la Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales “Ezequiel Zamora” y las comunidades localizadas en la cuenca del río Tinaco, pues se está haciendo frente a un problema inherente al área de gestión ambiental, que como se vio en el planteamiento del problema, puede causar impactos socioeconómicos y ambientales de importancia.

Por último, y conforme con los enunciados anteriores puede afirmarse que la investigación tiene una alta pertinencia de carácter social.

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Objetivo general

Estudiar los principales métodos que permiten conocer la estabilidad de cauces aluviales.

1.3.2. Objetivos específicos

Describir las principales características morfométricas y fluviales del río Tinaco en el tramo comprendido desde el sector el Topo hasta el puente la Cañita.

Estimar la capacidad de transporte de sedimentos del río Tinaco, en el tramo comprendido desde el sector el Topo hasta el puente la Cañita empleando modelos empíricos.

Estudiar los principales métodos que permiten conocer las características estables de un cauce aluvial, caso de estudio río Tinaco en el tramo comprendido desde el sector el Topo hasta el puente la Cañita, empleando teoría de régimen,

apoyada en los métodos de Lacey, Blench, Simons -Albertson y Kondap; y su comparación con condiciones reales medidas en campo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. A nivel internacional

En lo sucesivo, se presentan algunos trabajos publicados en el ámbito internacional que tienen relación con el interés de investigación del presente trabajo y que constituyen un aporte significativo al logro de los objetivos que se plantearon, pero enfatizando que por limitaciones de espacio debe considerarse esta sección una primera aproximación del estado del arte real.

García y Pérez (2014), en su trabajo titulado “Alteraciones geomorfológicas recientes en los sistemas fluviales mediterráneos de la Península Ibérica. Síntomas y problemas de incisión en los cauces”, la investigación pretendió dar una visión general de los recientes ajustes morfológicos que han sufrido los sistemas fluviales mediterráneos en la Península Ibérica a causa de la acción del hombre. En primer lugar, se expusieron las principales actuaciones que alteran la cuantía y el régimen de sus aportaciones de aguas y sedimentos. Luego de haber analizado la situación de inestabilidad y ruptura del equilibrio natural de muchos de estos sistemas, incluyendo las llanuras aluviales, se estudiaron los cambios más importantes observados en la morfodinámica de los cauces. Con especial detalle, por sus repercusiones ambientales y socioeconómicas, fue abordado el análisis de la creciente tendencia a la incisión del cauce durante las últimas décadas, así como su relación con la gestión de los recursos hidrológicos y las distintas acciones llevadas a cabo en cuencas y cursos de agua.

En el mismo orden de ideas es interesante señalar la contribución de Rivera-Trejo y otros, (2013) en su trabajo titulado “Inspección de cauces: guía de reconocimiento en campo”; en este trabajo se propone una guía metodológica de reconocimiento en campo para estudios fluviales e hidráulicos que permita asegurar la mayor cantidad de información tanto en cantidad como en calidad posible en una sola visita. Se muestra un ejemplo de aplicación de la guía en un tramo de 10 km sobre el río Hondo, ubicado a las orillas de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo,

México. La guía, por sí misma, no hace clasificaciones o evaluaciones del cauce, pero aporta los elementos necesarios para alcanzar estos objetivos. Los autores consideran que esta guía será de utilidad para ingenieros, técnicos y estudiosos de los ríos que deseen iniciarse en estudios de campo, o para dependencias como la Conagua, la CFE, los gobiernos estatales y federal, así como universidades e institutos involucrados en el mantenimiento, conservación, evaluación y manejo de cauces.

Resulta interesante reseñar los aportes de Buitrago y Ochoa, (2013) en su trabajo “Recomendaciones para la implementación de obras de protección y control de cauces”, las principales conclusiones presentadas son en primer lugar, que para la implementación de obras de protección y control de cauces se deben tener en cuenta las características geomorfológicas de las corrientes, con el fin de implementar la obra más favorable para la condición inicial del sitio de estudio, en segundo lugar se argumenta que en cualquier tipo de obra de estabilización de orillas de cauces, es de vital importancia el diseño e implementación de un sistema eficiente que garantice durabilidad, funcionalidad y seguridad de la misma, por último afirman que las obras de protección de cauces, permiten optimizar el recorrido dinámico de estos, no obstante la intervención de las condiciones naturales no se ve modificada totalmente, contrario a esto se busca mejorar, aprovechar y mantener la configuración inicial.

Asimismo, se muestra la contribución de Garagarza, (2012) quien realizó un estudio de la dinámica fluvial, transporte de sedimentos y estabilidad del Río Blanco, Provincia de Salta (Argentina), en la investigación se ha realizado una caracterización del Río Blanco en su tramo final con objeto de comprender la dinámica fluvial, transporte de sedimentos y estabilidad del canal. Las principales conclusiones obtenidas por la autora son: el tramo estudiado, se trata de un río trezado, con una intensidad de trezado variable. La estimación de caudales por los métodos de resistencia al flujo no son válidos para el escenario que se presenta. Los métodos expuestos de resistencia al flujo arrojan datos incoherentes, debido a la incompatibilidad de datos de entrada en las formulaciones. Con respecto al transporte de sedimentos se encontró que los diámetros menores se transportaran cuando se llene el cauce y los diámetros mayores se quedarán en reposo, los cálculos arrojan los

resultados esperados “el flujo con el cauce lleno es capaz de generar la tensión de fondo para que todos los diámetros presentes en la granulometría inicien el movimiento”. En cuanto a la cuantificación del transporte de sedimentos la autora encontró, que los cálculos realizados por distintas formulaciones (Gary Parker, Einstein-Brown, Meyer-Peter y Muller, W. H. Graf) ofrecen resultados cuantitativos de diferentes órdenes de magnitud. Por otra parte, este tipo de resultados suele ser común, y la labor del investigador reside en escoger el modelo que mejor se ajuste al río estudiado. Aun así, los resultados cualitativos obtenidos son satisfactorios, ya que las tendencias de los cuatro resultados son similares. Por último, el estudio de estabilidad de la zona erosionada arroja de acuerdo a la Teoría del Régimen, que el ancho (B), el tirante (H) y la pendiente (S) son funciones biunívocas del caudal a cauce lleno (QB) en un canal estabilizado; por tanto, en un canal estabilizado, se puede estimar el caudal si se conocen el ancho, el tirante y la pendiente media del tramo a estudiar. En cambio realizando el estudio de Teoría del Régimen en sentido contrario, se encuentra que los valores de QB para las tres estimaciones difieren en muchos órdenes de magnitud. La conclusión más clara que se obtuvo de éste fenómeno es que el canal no se encuentra en equilibrio.

Finalmente se tiene la contribución realizada por Bravo y León, (2011) que realizaron un trabajo titulado “Metodología para la estabilización del cauce de un río de llanura para la protección de puentes”; sus principales conclusiones son: en primer lugar el uso de modelos hidráulicos fusionados con las predicciones matemáticas, resultan herramientas de gran ayuda y alcance, que permiten de una manera económica y práctica, predecir comportamientos más cercanos a la realidad. En segundo lugar el uso adecuado de pilas con geometrías eficientes, refiriéndonos al tema hidráulico, constituyen el primer paso para la auto conservación de la estructura, sin embargo no es la solución más óptima ni definitiva, ya que como ha sido demostrado, la estabilización del cauce antes y después de la obra que se busca proteger, evita que el río “flanquee” al puente provocando su inminente colapso, por lo que la sección de una pilas intermedia, no ofrece mayores garantías para la estabilidad de la estructura ante el efecto erosivo del agua y divagación del cauce. Por

último, se tiene que la sobreexplotación de bosques, uso desmedido e irracional de los recursos naturales que se generan alrededor de los ríos, son las principales causas de los procesos erosivos erráticos que ponen en riesgo las estructuras viales.

Las investigaciones reseñadas guardan estrecha relación con la actual en el sentido de perseguir objetivos similares que tienen que ver con los métodos que permiten conocer las características estables de un cauce aluvial.

2.1.2. A nivel nacional

En este ámbito el arqueo de información ha permitido detectar solo un referente relacionado con el interés de investigación, lo que pone manifiesto la escases de investigaciones realizadas en el área.

En tal sentido se muestra el aporte realizado por Guzmán y otros, (2013) en su trabajo titulado “Cambios de canal durante los últimos 60 años en el sistema anastomosado del curso medio del río Apure” en este se analizaron los cambios de canal en la planicie de inundación del sistema anastomosado del curso medio del río Apure, Venezuela, con la finalidad de establecer los movimientos laterales de las márgenes del río. Además, se analizó la variación multitemporal de los cambios en la dinámica geomorfológica del patrón de canal durante un periodo de evolución de 60 años. Los datos fueron transferidos a un sistema de información geográfica (SIG) para analizar los cambios ocurridos durante cinco periodos de evolución. Se utilizó cartografías históricas y sucesiones de fotografías aéreas, y se realizó fotointerpretación detallada de fotos aéreas, ortofotomapas y mapas topográficos a diferentes escalas y años. El tramo analizado comprende desde el sector conocido como Isla Los Padrotes hasta Caño la Rompida (19 km de longitud). Los resultados muestran que el patrón arquitectónico del sistema anastomosado del río Apure durante los últimos 60 años en general es estable en todo su conjunto de red de brazos, con pequeños cambios morfodinámicos en la posición de las barras e islas. Los desplazamientos máximos de márgenes se observan en Isla Los Padrotes, aunque en esta zona el río ha mantenido la misma morfología.

2.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A continuación se presentan una serie de conceptos relacionados con los principales objetivos que se plantearon en esta investigación y que ayudan a la comprensión de la temática abordada.

2.2.1. Arrastre en la capa de fondo

Es el material del fondo del cauce que es arrastrado por la corriente dentro de la capa de fondo, cuyo espesor según Einstein, es igual a dos veces el diámetro de la partícula considerada (Maza y García, 1996). Otros autores, como van Rijn y Pacheco-Ceballos, han propuesto diferentes espesores para esta capa de fondo y cuando ello ocurre, el valor de ese espesor se indica claramente en la presentación del método correspondiente.

El arrastre en la capa de fondo se calcula en función de las características hidráulicas de la corriente, de la geometría del cauce y de las propiedades físicas del material del fondo.

2.2.2. Estabilidad de cauces

En condiciones normales todos los tramos de todos los ríos han alcanzado un cierto de equilibrio, lo cual significa que si en forma artificial no se modifican uno o varios de los parámetros que intervienen en esa condición de estabilidad, el agua y los sedimentos continuarán escurriendo en la forma como lo viene haciendo. Si se modifican en forma natural o artificial algunos parámetros, con el tiempo y lentamente el tramo de río cambiará a una nueva condición de equilibrio (Maza y García, 1996).

Entre los parámetros que intervienen en dicho equilibrio se pueden citar:

Q: gasto líquido y su distribución a lo largo del año, en m^3/s

QBT: gasto sólido. Es el transporte del material de fondo tanto en la capa de fondo como en suspensión, en Kgf/s o en m^3/s . Se distinguirá la capacidad de transporte del tramo en estudio, del que es aportado lateralmente al tramo por pequeños afluentes o la cuenca misma; sobre todo en zonas de montaña con fuertes pendientes y escasa vegetación.

B: ancho de la superficie libre de la corriente, en m.

dm: tirante medio, en m. Se obtiene de dividir el área A, entre el ancho medio.

S: pendiente de la pérdida de carga a lo largo del río.

Di: diámetro representativo del material de fondo, en m; en que i es el porcentaje de la mezcla, en peso, que tiene un diámetro menor que Di

K: factor que toma en cuenta la resistencia de las orillas a ser erosionadas

γ : peso específico del agua, en Kgf/m³

γ_s : peso específico de las partículas del material de fondo, en Kgf/m³

CL: concentración del material de lavado, en Kgf/m³; que es el material arrastrado en suspensión y cuyo tamaño es menor de 0,062 mm

No: número de brazos o cauces por los que escurre el agua

En general, se puede indicar que existe un equilibrio entre el gasto líquido, el gasto sólido que entra al tramo en estudio y el que es capaz de transportar el río dentro de ese mismo tramo, las características del material del fondo y orillas, la pendiente longitudinal del río y la geometría de la sección transversal del escurrimiento.

Una modificación a cualquiera de los parámetros anteriores, repercutirá en los demás y los modificará hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio. Las modificaciones pueden ser bruscas o lentas y naturales o debidas al factor humano.

2.2.3. Grados de libertad

Según Maza y García, (1996) el grado de libertad de un escurrimiento es el número de parámetros que pueden ajustarse libremente, con el tiempo, al pasar gastos líquidos y sólidos preestablecidos.

2.2.4. Escurrimiento con un grado de libertad

Cuando al variar el gasto en un cauce o canal sólo varía el tirante, se dice que existe un grado de libertad. Esto ocurre si el fondo, las paredes y la pendiente no cambian al variar el gasto; por ejemplo un canal revestido. Cuando se tiene un grado de libertad no existe transporte de sedimentos (*Ibidem*).

La figura 1 muestra un ejemplo de un río que escurre con un grado de libertad.



Figura 1. Río con un grado de libertad, cambio del tirante

Fuente: adaptado de Maza y García, (1996)

2.2.5. Esguerrimiento con dos grados de libertad

Cuando sólo pueden variar el tirante y la pendiente, se dice que el cauce tiene dos grados de libertad (ver figura 2). Esto puede ocurrir cuando las márgenes son muy resistentes pero el fondo no (*Ibidem*).



Figura 2. Río con dos grados de libertad; pendiente, tirante

Fuente: adaptado de Maza y García, (1996)

2.2.6. Esguerrimiento con tres grados de libertad

Comentan Maza y García (1996), si además del tirante y la pendiente, también pueden alterarse las márgenes y ajustarse al ancho, se dice que el cauce tiene tres grados de libertad (*Ibidem*). Este ajuste se logra en aquellos cauces cuyas márgenes y fondo estén formados por un material susceptible de ser movido y transportado por la corriente. Los ríos y arroyos que escurrén en material aluvial generalmente tienen tres grados de libertad. Un ejemplo de esta condición se muestra en la figura 3.



Figura 3. Río con tres grados de libertad; pendiente, tirante y ancho

Fuente: adaptado de Maza y García, (1996)

2.2.7. Esguerrimiento con cuatro grados de libertad

Para algunos autores existe un cuarto grado de libertad. Este cuarto grado de libertad lo tienen los cauces con tres grados de libertad cuando llegan a desarrollar meandros. A pesar de aceptar ese grado más de libertad, los autores que lo proponen no presentan cuatro ecuaciones que al resolverse simultáneamente permitan obtener las variables geométricas, más el grado de curvatura de los meandros, sino que invariablemente eligen tres ecuaciones para resolver tres grados de libertad y posteriormente tratan a los meandros por separado; por ello proponen otras

ecuaciones complementarias para establecer sus características geométricas (*Ibidem*). La figura 4 muestra un ejemplo de esta condición.



Figura 4. Río Coatzacoalcos en la zona intermedia, meandros abandonados, cuatro grados de libertad
Fuente: adaptado de Maza y García, (1996)

2.2.8. Teoría de régimen

La teoría de régimen fue iniciada en 1895 por Kennedy, quien para diseñar una red de canales no revestidos, observó y midió las dimensiones de canales del sistema Alto Bari Doab en la India que ya habían estado en operación, y por tanto, su sección se había ajustado a unas dimensiones estables en función de los gastos que transportaban, tanto líquidos como de sedimentos (Maza y García, 1996). El autor obtuvo que la velocidad media era función del tirante y con esa relación dimensionó futuros canales. La relación que encontró es:

$$U = 0,548 d^{0,64} \quad (1)$$

Dónde: U es la velocidad media de la corriente, en m/s; d es el tirante, en m
Kennedy al igual que otros investigadores comprobó que el exponente y el coeficiente de la ecuación (1) variaban para canales de otras regiones. Por tanto, dicha ecuación se escribió como:

$$U = C d^m \quad (2)$$

Dónde: C es un coeficiente que varía de 0,67 a 0,95 (Lacey); 0,25 a 1,20 (otros autores); m exponente que varía entre 0,52 y 0,64 (Lacey); 0,61 a 0,73 (otros autores)

Sin embargo, fue Lindley en 1919, quien utilizó por primera vez la palabra régimen e indicó que un canal está en régimen cuando su sección y pendiente están en equilibrio con el gasto transportado, de tal manera que aumentos o disminuciones de él, hacen que el ancho y tirante se modifiquen en función de estos valores. Con ello, al finalizar periodos anuales, las secciones y pendientes prácticamente permanecen constantes.

2.2.8.1. Método de Lacey

Este autor continuó y amplió los estudios de Lindley, realizó un análisis completo y riguroso con todos los datos disponibles y publicó sus resultados en 1930, 1934, 1939, 1946 y 1958, siendo las dos primeras y la última las más destacadas. En 1958, recapituló todas sus observaciones y presentó sus ecuaciones utilizando en ellas tanto el perímetro mojado y radio hidráulico como el ancho de la superficie libre y tirante medio de la sección. Además generalizó el empleo de sus ecuaciones en el diseño de modelos hidráulicos (Maza y García, 1996).

Las ecuaciones de su método son:

$$f = 50,60 Dm^{1/2} \quad (3)$$

$$Na = 0,0225f^{1/4} = 0,06 Dm^{1/8} \quad (4)$$

$$B = 4,831 Q^{1/2} \quad (5)$$

$$U = 0,635 (f dm)^{1/2} = 4,516 Dm^{1/4} dm^{1/2} \quad (6)$$

$$U = \frac{dm^{1/4}(RS)^{1/2}}{Na} = \frac{dm^{1/4}}{0,06 Dm^{1/8}} (RS)^{1/2} \quad (7)$$

$$Q = U \cdot A \quad (8)$$

$$R = A/P \quad (9)$$

$$dm = A/B \quad (10)$$

$$dm = 0,474 \left(\frac{Q}{f}\right)^{1/3} = 0,128 \frac{Q^{1/3}}{Dm^{1/6}} \quad (11)$$

$$A = 2,29 \frac{Q^{5/6}}{f^{1/3}} = 0,619 \frac{Q^{5/6}}{Dm^{1/6}} \quad (12)$$

$$RS = 0,000794 \frac{U^3}{dm} \quad (13)$$

$$RS = 0,0002032 f^{\frac{3}{2}} dm^{1/2} \quad (14)$$

$$RS = 0,000141 f^{\frac{4}{3}} Q^{1/6} \quad (15)$$

$$U = 3125 \frac{RS}{f} \quad (16)$$

$$U = 0,437 (f^2 Q)^{\frac{1}{6}} = 1,616 (Dm Q)^{1/6} \quad (17)$$

En las ecuaciones anteriores el significado de las variables es el siguiente:

B: ancho de la superficie libre del agua, en m

dm: tirante medio en m

A: área hidráulica en m²

P: perímetro mojado en m

R: radio hidráulico en m

S: pendiente hidráulica sin unidades

Q: gasto líquido en m³/s

U: velocidad media de la corriente en m/s

f: factor de sedimentación

Na: rugosidad absoluta

Dm: diámetro medio del material de fondo, en m

2.2.8.2. Método de Blench

Al considerar las observaciones de varios autores, Blench en 1939 y 1941, así como en artículos y libros que publicó luego, presentó sus fórmulas básicas y de diseño. Su método toma en cuenta dos parámetros introducidos por él que son: factor de fondo (Fb) y factor de orilla (Fs).

Esos parámetros son función de la concentración del material transportado en suspensión, del diámetro de las partículas del fondo y de la resistencia de las orillas a ser erosionadas. Las fórmulas para valuarlos o sus valores recomendados se resumen a continuación.

Factor de fondo: toma en cuenta la resistencia del fondo y se obtiene mediante la expresión aproximada:

$$Fb = Fb_0 (1 + 0,012 C) \quad (18)$$

Esta fórmula es aplicable a fondos arenosos con transporte de sedimentos en que se han formado dunas. En la fórmula anterior, C es la concentración del material arrastrado en la capa de fondo, expresado en partes por millón y Fb_0 se obtiene de

$$Fb_0 = 60,1 Dm^{1/2} \quad (19)$$

Dm: diámetro medio en m

Cuando existe poca información, Blench recomendó utilizar para Fb, los siguientes valores:

Fb = 0,8 (material fino, $Dm \leq 0,5$ mm)

Fb = 1,2 (material grueso, $Dm > 0,5$ mm)

Factor de orilla: este parámetro, que mide la resistencia de las orillas, es obtenido con la siguiente expresión:

$$F_s = \frac{Fb_s^2}{8} \quad (20)$$

Para el factor de orilla, Blench recomienda los siguientes valores:

Fs: 0,1 (material poco cohesivo, como arena)

Fs: 0,2 (material medianamente cohesivo)

Fs: 0,3 (material muy cohesivo, como arcilla)

Las tres ecuaciones básicas propuestas por Blench para cauces estables son:

$$Fb = 3,28 U^2 / d \quad (21)$$

$$F_s = 10,76 U^3 / b_m \quad (22)$$

$$\frac{U^2}{gdS} = 3,63 \left(1 + \frac{C}{2330}\right) \left(\frac{U b_m}{v}\right)^{1/4} \quad (23)$$

El significado de las variables es:

C: concentración del material arrastrado en la capa del fondo. Se obtiene dividiendo el peso seco del material arrastrado en la capa de fondo entre el peso total del líquido, ambos por segundo, y se expresa en ppm

v: viscosidad de la mezcla agua-sedimento, en m^2/s

d: tirante de la corriente medido del fondo a la superficie, en m

g: aceleración de gravedad en m^2/s

b_m : ancho medio de la sección, cumple con la relación

$$A = d \cdot b_m \quad (24)$$

Las ecuaciones de diseño propuestas por Blench son:

$$bm = 1,81 \left(\frac{Fb Q}{F_S} \right)^{1/2} \quad (25)$$

$$d = \left(\frac{F_S Q}{Fb^2} \right)^{1/3} \quad (26)$$

$$S = \frac{Fb^{5/6} F_S^{1/12}}{3,28 K Q^{1/6} \left(1 + \frac{c}{2330} \right)} \quad (27)$$

Donde K agrupa a las principales constantes, es decir

$$K = 3,63 \frac{g}{v^{1/4}} \quad (28)$$

2.2.8.3. Método de Simons y Albertson

Estos autores utilizaron datos obtenidos en la India y Estados Unidos y presentaron sus ecuaciones en 1963. El método tiene la ventaja de ser aplicable a un rango mayor de materiales de fondo y orillas, lo cual es tenido en cuenta en los coeficientes que se muestran más adelante. Las ecuaciones son:

$$P = K_1 Q^{0,512} \quad (29)$$

$$R = K_2 Q^{0,361} \quad (30)$$

$$A = K_1 K_2 Q^{0,873} \quad (31)$$

$$bm = 0,9 P = K_1 Q^{0,512} \quad (32)$$

$$bm = 0,92 B - 0,61 \quad (33)$$

Para obtener el tirante de la corriente se proponen dos ecuaciones. La primera es útil si $R \leq 2,60$ m

$$d = 1,21 R = 1,21 K_2 Q^{0,361} \quad (34)$$

Y la segunda si $R > 2,60$ m

$$d = 0,61 + 0,93 R = 0,61 + 0,93 K_2 Q^{0,361} \quad (35)$$

Para obtener la pendiente se recomiendan las siguientes ecuaciones:

Si $Ud/v < 2 \times 10^7$ se utiliza la expresión:

$$\frac{Q}{RP} = U = K_3 (R^2 S)^{m'} \quad (36)$$

Si $Ud/v > 2 \times 10^7$ se utiliza una relación semejante a la propuesta por Blench:

$$\frac{U^2}{gdS} = K_4 \left(\frac{U \, bm}{v} \right)^{0,37} \quad (37)$$

Otra expresión de interés para obtener la pendiente es:

$$S = \left(\frac{1}{K_1 K_3 K_2^{1+2m'} Q^{0,722m'-0,127}} \right)^{\frac{1}{m'}} \quad (38)$$

Nota: el significado de todas las variables es el mismo que se ha explicado con anterioridad.

Los valores de los coeficientes y exponentes dependen de los materiales del fondo y las orillas y se muestran en la tabla N° 1.

Tabla 1

Valores de los coeficientes del método de Simons y Albertson

Material	K1	K2	K3	K4	m'
1.-Fondo y orilla de arena	6,30	0,41	(9,33)	0,324	(1/3)
2.-Fondo de arena y orillas cohesivas	(4,74)	(0,47)	(10,77)	(0,525)	(1/3)
3.-Fondo y orillas cohesivas	3,96	0,56	-	0,87	-
4.-Fondo y orillas con material grueso no cohesivo	3,16	(0,27)	(10,76)	0,85	(0,286)
5.- Igual que 2 pero con mucho transporte $2000 \leq C \leq 8000$ ppm	3,09	0,36	9,68	-	0,286

Nota: los valores entre paréntesis fueron dados por Simons y Albertson (1963). Los demás se obtuvieron de las figuras que ellos elaboraron. C es la concentración, en peso, del material del fondo que es transportado.

2.2.8.4. Método de Kondap

Las ecuaciones fueron obtenidas por el referido autor para 1977. Hay que resaltar que también tienen un carácter completamente empírico, y que fueron obtenidas de relaciones entre parámetros adimensionales, siendo la que relaciona a B/Dm la que mostró un ajuste casi perfecto.

Las ecuaciones presentadas por Kondap son:

$$\frac{B}{Dm} = 0,212 \left(\frac{g \, Dm^3}{v^2} \right)^{0,1155} \left(\frac{Q^2}{g \, \Delta \, Dm^5} \right)^{0,274} \quad (39)$$

$$\frac{A}{Dm^2} = 2,21 \left(\frac{Q^2}{g \Delta Dm^5} \right)^{0,4275} \quad (40)$$

$$\frac{S}{\Delta} = 0,0422 \left(\frac{Q^2}{A^2 g \Delta Dm} \right)^{0,75} \left(\frac{Dm}{d} \right)^{1,095} \quad (41)$$

$$\Delta = \frac{(\gamma_s - \gamma)}{\gamma} \quad (42)$$

A partir de las ecuaciones presentadas por Kondap, los autores han derivado las que a continuación se señalan y que son de utilidad a los proyectistas.

$$B = \frac{0,212 Q^{0,548}}{Dm^{0,024} g^{0,159} \Delta^{0,274} \nu^{0,231}} \quad (43)$$

$$dm = \frac{10,425 Q^{0,307} \nu^{0,231}}{Dm^{0,1144} g^{0,269} \Delta^{0,154}} \quad (44)$$

$$A = \frac{2,21 Q^{0,855}}{Dm^{0,138} (g\Delta)^{0,428}} \quad (45)$$

$$S = \frac{Dm^{0,677} g^{0,186} \Delta^{1,061}}{1014 Q^{0,119} \nu^{0,253}} \quad (46)$$

Dónde: Δ es la densidad relativa de la partícula

Nota: el significado de todas las restantes variables es el mismo que se ha explicado con anterioridad en los otros métodos.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación que respaldó este Informe Final fue no experimental, básica por su finalidad, prospectiva según el corte en el tiempo de estudio, descriptiva de acuerdo a el nivel de profundidad, de campo respecto al lugar donde se realizó, evolutiva en función a la evaluación del objeto que se estudió, mixta por la fuente de datos que utilizaron los investigadores y cuantitativa según la naturaleza de los datos o información obtenida (Narváez, 1997).

3.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

Se congregaron aspectos inherentes a los niveles exploratorio y explicativo (Ramírez, 1999; Hernández *et al.*, 2010).

3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño del presente trabajo correspondió a la investigación no experimental; en éste los datos de interés son recogidos en forma directa de la realidad, mediante el trabajo concreto del investigador y su equipo.

“La investigación no experimental se enfoca en observar fenómenos tal y como se dan en su contexto natural, para después analizarlos”. (Hernández *et al.*, 2010).

3.4. UNIDAD DE ESTUDIO

El estudio se realizó en el río Tinaco en el tramo comprendido desde el sector el Topo hasta el puente La Cañita. Es de resaltar que el mencionado río nace en la fila Naranjal en los límites de Cojedes con Carabobo, toma su nombre al unirse el río Tamanaco con el río Macapo y desemboca en el río San Carlos.

3.5. FASES DE LA INVESTIGACIÓN

3.5.1. Descripción de las principales características morfométricas y fluviales del río Tinaco en el tramo comprendido desde el sector el Topo hasta el puente La Cañita:

Se recopiló la información pertinente para tener un panorama más claro del tema que se analiza. Se estudió a fondo las investigaciones más relevantes que permitieron conocer las diferentes fórmulas o métodos que permiten predecir las características estables del río Tinaco empleando la teoría de régimen. Para el caso de

aplicación, y con la ayuda de fotografías aéreas e imágenes de satélite de la zona de estudio se obtuvo toda la información complementaria que permitió realizar un análisis de los principales parámetros hidráulicos, sedimentológicos y morfológicos del río Tinaco en el tramo estudiado.

3.5.2. Estimación de la capacidad de transporte de sedimentos del río Tinaco, en el tramo comprendido desde el sector El Topo hasta el puente La Cañita empleando modelos empíricos:

1.-Para la evaluación de la capacidad de transporte de sedimentos del río Tinaco se emplearon modelos empíricos de predicción.

La capacidad de transporte del río Tinaco en el tramo bajo estudio se estimó de forma individual para varias secciones de control, las cuales fueron perpendiculares al sentido del flujo. El procedimiento de cálculo empleado es el siguiente:

1.1.- Capacidad de transporte del lecho (carga de lecho): se hizo uso de la ecuación de Meyer-Peter (1949, 1951), cuya expresión general es:

$$\frac{q_s}{\sqrt{(s-1)g d_{50}^3}} = \left(\frac{4\tau_o}{\rho(s-1)g d_{50}} - 0.188 \right)^{3/2} \quad (47)$$

Dónde:

ρ : densidad del fluido, 1000 kg/m³

$\tau_o = \tau_o'$: esfuerzo cortante de fricción superficial, Pascal

g : aceleración de gravedad, 9.81 m/s²

s : densidad específica del sedimento, adimensional

d_{50} : diámetro 50 de la curva granulométrica del sedimento, m

q_s : transporte de sedimentos, expresado en unidades de volumen por unidad de tiempo y de ancho, m³/s.m

1.2.- Capacidad de transporte de sedimento suspendido (carga suspendida): se aplicó el método desarrollado por Van Rijn (1984: citado por Chanson 2002). Bajo este enfoque, la tasa de transporte volumétrica de carga en suspensión por unidad de ancho, q_s , se estima en m³/s.m de la siguiente manera:

$$q_s = \int_{\delta_s}^{d-\delta_s} C_s v dy \quad (48)$$

Dónde: C_s es la concentración de sedimento en suspensión en función de la profundidad, %; v es la velocidad en función de y (perfil de velocidad), m/s; dy es un diferencial de profundidad del agua en la sección, m; δ_s es el espesor de la capa de carga de lecho, m; d es la distancia entre el lecho de fondo y la superficie, m.

$$C_s = (C_s)_{cl} \cdot \left[\frac{\frac{d}{y} - 1}{\frac{d}{(\delta_s)_{cl}} - 1} \right]^{\frac{w_s}{K \cdot V^*}} \quad (49)$$

Dónde: $(C_s)_{cl}$ representa la concentración de sedimento en la capa de carga de lecho, % volumétrico; d es la profundidad entre la capa de sedimento y la superficie, m; $(\delta_s)_{cl}$ es el espesor de la capa de carga de lecho, m; y representa la distancia desde la capa de carga de lecho hacia arriba, m; w_s es la velocidad terminal de la partícula, m/s; V^* es la velocidad de corte en la sección evaluada, m/s; K se denomina constante del von Karman, y es considerada habitualmente igual a 0.4

$$(C_s)_{cl} = \frac{0.117}{ds} \left[\frac{\gamma^2}{(s-1)g} \right]^{1/3} \cdot \left[\frac{\tau^0}{(\tau^0)_c} - 1 \right] \quad (50)$$

Dónde: d_s es el diámetro medio del sedimento, m [se suele emplear el d_{50}]; $(\tau^*)_c$ es el parámetro crítico de Shields que inicia el movimiento de la carga de lecho, adimensional; s es la gravedad específica del sedimento, adimensional; g es la aceleración de gravedad, 9.81 m/s^2 ; γ es la viscosidad del fluido a la temperatura media, m^2/s . Se advierte que si $(C_s)_{cl} > 0.65$, se debe usar $(C_s)_{cl} = 0.65$. El término τ^* , se calcula como sigue:

$$\tau^* = \frac{\tau^0}{\rho_w (s-1) g ds} \quad (51)$$

$(\delta_s)_{cl}$ se determina de la siguiente manera:

$$(\delta_s)_{cl} = 0.3 ds \times \left[ds \cdot \left[\frac{(s-1) \cdot g}{\gamma^2} \right]^{1/3} \right]^{0.7} \cdot \sqrt{\frac{\tau^*}{(\tau^*)_c} - 1} \quad (52)$$

El parámetro crítico de Shields que inicia el movimiento de la carga de lecho, $(\tau^*)_c$. Si se considera la ocurrencia de un flujo turbulento, el perfil de velocidad puede estimarse como sigue:

$$\frac{V}{V_{\max}} = \left[\frac{y}{d} \right]^{\frac{1}{N}} \quad (53)$$

$$V_{\max} = \frac{N+1}{N} V^* \sqrt{\frac{8}{f}} \quad (54)$$

Dónde: v es la velocidad de una capa delgada de fluido a una distancia, y , del lecho de sedimento, m/s; V_{\max} es la velocidad máxima del flujo en la superficie, m/s; d es la profundidad del agua en la sección, m (puede sustituirse por el radio hidráulico); y es la distancia desde la capa de carga de lecho hacia arriba, m.

Chen (1990: citado por Chanson 2002), propone calcular N de la siguiente manera:

$$N = 0.4 \sqrt{\frac{8}{f}} \quad (55)$$

Dónde: f es el factor de fricción de Darcy-Weisbach, adimensional; V^* es la velocidad de corte en la sección, m/s

1.3.-Capacidad de transporte total: se determinó sumando la capacidad de transporte de fondo a la capacidad de transporte por suspensión. Si la capacidad de transporte total en una sección de control es mayor que la carga de sedimento transportada por el cauce, el lecho tenderá a erosionarse, en caso contrario se observará acreción (deposición progresiva de sedimento en el lecho; esta situación genera desbordes hacia la planicie de inundación). La carga de sedimento transportada en la sección se estimó a partir de diversas muestras tomadas en campo, las cuales fueron llevadas al laboratorio para calcular la carga de sedimento suspendida que está siendo transportada en gramos por unidad de gasto volumétrico y ancho de sección.

3.5.3. Estudio de los principales métodos que permiten conocer las características estables de un cauce aluvial, caso de estudio río Tinaco en el tramo comprendido desde el sector El Topo hasta el puente La Cañita, empleando teoría de régimen, apoyada en los métodos de Lacey, Blench, Simons -Albertson y Kondap; y su comparación con condiciones reales medidas en campo:

Con la información que se generó en las fases I y II se determinaron las características estables del río Tinaco empleando teoría de régimen, apoyada en los métodos de Lacey, Blench, Simons - Albertson y Kondap, ya descritos en los fundamentos teóricos.

CAPÍTULO IV

DESCRIPCIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. PRINCIPALES PARÁMETROS MORFOLÓGICOS Y FLUVIALES DEL RÍO TINACO EN EL TRAMO COMPRENDIDO DEL SECTOR EL TOPO HASTA EL PUENTE LA CAÑITA

En el mencionado tramo fueron analizados los siguientes sitios: el Topo, planta de tratamiento vieja, planta de tratamiento nueva y puente la Cañita. Seguidamente se muestran las principales características de los sedimentos de fondo analizados en los sitios indicados anteriormente así como parámetros hidráulicos y fluviales.

4.1.1. Principales características de los sedimentos de fondo, parámetros hidráulicos y fluviales del tramo estudiado

En lo sucesivo se exponen las principales características de los sedimentos de fondo, parámetros hidráulicos y fluviales de cada uno de los sitios seleccionados en el tramo estudiado.

Sector Planta de tratamiento nueva (Hidrocentro)

La tabla 2 muestra los diámetros característicos de una muestra del lecho.

Tabla 2

Diámetros característicos de una muestra del lecho, Planta de tratamiento nueva (Hidrocentro)

d_x	mm	m
d ₉₀	23,78640	0,02379
d ₅₀	4,66830	0,00467
d ₁₀	0,40640	0,00041
d ₈₄	19,70130	0,01970
d ₁₆	1,28350	0,00128

Fuente: Esqueda (2018)

Densidad del sedimento, $d_s = 2845,02 \text{ Kg/m}^3$

Porosidad, $P_o = 0,355$

Relación de vacíos, $R_v = 0,55$

Distribución estándar geométrica, $C_g = 3.93$; como $C_g \geq 3,00$ hay riesgo de acorazamiento

Carga de lavado, $C_L = 307 \text{ mg/lt}$

Medidas en sección de control:

Área total, $A_t = 2,38115 \text{ m}^2$

Perímetro mojado, $P_w = 10,98511 \text{ m}$

Pendiente del lecho, $\theta = 0,584397^\circ$

Parámetros hidráulicos estimados en la sección de control:

Esfuerzo de cizalladura: $21,69 \text{ N/m}^2$

¿El d_{50} y los granos de menor tamaño se mueven?: sí

Forma probable sobre del lecho: duna

El esfuerzo cortante de forma del lecho se estima con: ecuación de Van Rijn (1984c)

Factor de fricción de Darcy: 0,074

Esfuerzo cortante de fricción superficial: $12,439 \text{ N/m}^2$

Esfuerzo cortante de forma del lecho: $9,250 \text{ N/m}^2$

Sector planta de tratamiento vieja (Hidrocentro)

La tabla 3 expone los principales diámetros característicos de una muestra del lecho, Planta de tratamiento vieja (Hidrocentro)

Tabla 3

Diámetros característicos de una muestra del lecho, Planta de tratamiento vieja (Hidrocentro)

d_x	mm	m
d_{90}	24,39880	0,02440
d_{50}	9,38160	0,00938
d_{10}	0,97730	0,00098
d_{84}	21,66830	0,02167
d_{16}	10,29030	0,01029

Fuente: Esqueda (2018)

Densidad del sedimento, $d_s = 2806,10 \text{ Kg/m}^3$

Porosidad, $P_o = 0,368$

Relación de vacíos, $R_v = 0,584$

Distribución estándar geométrica, $C_g = 1.61$; no hay riesgo de acorazamiento, [Ya que $C_g < 3,00$]

Carga de lavado, $C_L = 296 \text{ mg/lt}$

Medidas en sección de control:

Área total, $A_t = 5,594 \text{ m}^2$

Perímetro mojado, $P_w = 9,71684 \text{ m}$

Pendiente media del lecho, $\theta = 0,746234^\circ$

Parámetros hidráulicos estimados en la sección de control:

Esfuerzo de cizalladura: $73,55 \text{ N/m}^2$

¿El d_{50} y los granos de menor tamaño se mueven?: sí

Forma probable sobre del lecho: duna

El esfuerzo cortante de forma del lecho se estima con: ecuación de Van Rijn (1984c)

Factor de fricción de Darcy: 0,049

Velocidad media en la sección: $2,578 \text{ m/s}$

Esfuerzo cortante de fricción superficial: $41,294 \text{ N/m}^2$

Esfuerzo cortante de forma del lecho: $32,259 \text{ N/m}^2$

Sector Aguas arriba del Puente La Cañita

La muestra del lecho correspondiente al sitio aguas arriba del puente La Cañita, exhibe los siguientes diámetros característicos, ver tabla 4

Tabla 4

Diámetros característicos de una muestra del lecho, Aguas arriba del Puente La Cañita

d_x	mm	m
d_{90}	28,22470	0,02822
d_{50}	12,70320	0,01270
d_{10}	1,48520	0,00149
d_{84}	25,76130	0,02576
d_{16}	3,00840	0,00301

Fuente: Esqueda (2018)

Densidad del sedimento, $d_s = 2881,945 \text{ Kg/m}^3$

Porosidad, $P_o = 0,385$

Relación de vacíos, $R_v = 0,626$

Distribución estándar geométrica, $C_g = 2,926$; [no hay riesgo de acorazamiento, ya que $C_g < 3,00$]

Carga de lavado $C_L = 270$ mg/lit

Medidas en sección de control:

Área total, $A_t = 14,9754$ m²

Perímetro mojado, $P_w = 21,92947$ m

Pendiente de lecho, $\theta = 0,234911^\circ$

Parámetros hidráulicos estimados en la sección de control:

Esfuerzo de cizalladura: $27,466$ N/m²

¿El d_{50} y los granos de menor tamaño se mueven?: sí

Forma probable sobre del lecho: duna

El esfuerzo cortante de forma del lecho se estima con: ecuación de Van Rijn (1984c)

Factor de fricción de Darcy: $0,0492$

Velocidad media en la sección: $1,781$ m/s

Esfuerzo cortante de fricción superficial: $19,518$ N/m²

Esfuerzo cortante de forma del lecho: $7,947$ N/m²

Sector Aguas abajo del Puente La Cañita

La tabla 5 expone los principales diámetros característicos de una muestra del lecho.

Tabla 5

Diámetros característicos de una muestra del lecho, Aguas abajo del Puente La Cañita

d_x	mm	m
d_{90}	22,96300	0,02296
d_{50}	8,43210	0,00843
d_{10}	1,25650	0,00126
d_{84}	20,47090	0,02047
d_{16}	1,88570	0,00189

Fuente: Esqueda (2018)

Densidad del sedimento $d_s = 2814,719$ Kg/m³

Porosidad, $P_o = 0,353$ (porosidad)

Relación de vacíos, $R_v = 0,545$

Distribución estándar geométrica, $C_g = 3,29$; [hay riesgo de acorazamiento, ya que $C_g > 3,00$]

Carga de lavado, $C_L = 228 \text{ mg/lt}$

Medidas en sección de control:

Área total, $A_t = 8,7724 \text{ m}^2$

Perímetro mojado, $P_w = 16,31799 \text{ m}$

Pendiente del lecho, $\theta = 0,299081^\circ$

Parámetros hidráulicos estimados en la sección de control:

Esfuerzo de cizalladura: $27,52 \text{ N/m}^2$

¿El d_{50} y los granos de menor tamaño se mueven?: sí

Forma probable sobre del lecho: duna

El esfuerzo cortante de forma del lecho se estima con: ecuación de Van Rijn (1984c)

Factor de fricción de Darcy: $0,0498$

Velocidad media en la sección: $1,5845 \text{ m/s}$

Esfuerzo cortante de fricción superficial: $15,643 \text{ N/m}^2$

Esfuerzo cortante de forma del lecho: $11,886 \text{ N/m}^2$

Sector Tinaco, entrada a El Topo

La muestra del lecho correspondiente al sitio Tinaco, entrada a El Topo, exhibe los siguientes diámetros característicos, ver tabla 6.

Tabla 6

Diámetros característicos de una muestra del lecho, Tinaco, entrada a El Topo

d_x	mm	m
d_{90}	25.4000	0.0254
d_{50}	1.9943	0.0020
d_{10}	0.6283	0.0006
d_{84}	25.0000	0.0250
d_{16}	0.7338	0.0007

Fuente: Esqueda (2018)

Densidad del sedimento, $d_s = 3009.64 \text{ Kg/m}^3$

Porosidad, $P_o = 0.469$

Relación de vacíos, $R_v = 0.883$

Distribución estándar geométrica, $C_g = 5.83$; [hay riesgo de acorazamiento, ya que $C_g \geq 3,00$]

Carga de lavado, $C_L = 223 \text{ mg/lt}$

Medidas en sección de control:

Área total, $A_t = 6.181 \text{ m}^2$

Perímetro mojado, $P_w = 23.5296 \text{ m}$

Pendiente media del lecho, $\theta = 0.286476^\circ$

Parámetros hidráulicos estimados en la sección de control:

Esfuerzo de cizalladura: 12.88 N/m^2

¿El d_{50} y los granos de menor tamaño se mueven?: sí

Forma probable sobre del lecho: duna

El esfuerzo cortante de forma del lecho se estima con: ecuación de Van Rijn (1984c)

Factor de fricción de Darcy: 0.070

Velocidad media en la sección: 1.024 m/s

Esfuerzo cortante de fricción superficial: 9.227 N/m^2

Esfuerzo cortante de forma del lecho: 3.656 N/m^2

4.1.2. Clasificación del río Tinaco en el tramo estudiado

De acuerdo a la clasificación por tramos propuesta por Lojtin, el tramo estudiado se corresponde con un río de planicie poco caudaloso, tomando en consideración los siguientes parámetros obtenidos.

Relación $D_{50} / S_0 = 1,0864$

Número de froude, $Fr = 0,056$

Con respecto a la clasificación de acuerdo al material de las márgenes y el fondo, el tramo estudiado se clasifica como no cohesivo con predominio de grava y arena, es acorazado ya que la desviación estándar geométrica $\sigma_g > 3$ lo que indica que es bien graduado o de granulometría extendida.

Por geometría, el tramo estudiado se considera altamente sinuoso, este hallazgo se apoya en los valores obtenidos de sinuosidad (S) que oscilan entre 2,5 y 3,5. Esta categorización se apoya en la tabla 7.

Tabla 7
Categorías del Índice de sinuosidad

CATEGORIAS	Índice de sinuosidad (S)
Baja sinuosidad	$S < 1,3$
Moderada	$1,3 < S < 2$
Alta sinuosidad	$S > 2$

Fuente: Esqueda (2018)

4.1.3. Estimación de la capacidad de transporte de sedimentos en un tramo del río Tinaco empleando modelos empíricos

Bajo las condiciones hidráulicas y sedimentológicas evaluadas en el río Tinaco se tiene que la capacidad de transporte de sedimentos presenta los valores que se muestran en la tabla 8.

Tabla 8
Capacidad de transporte de sedimentos en un tramo del río Tinaco

Sector	Capacidad de transporte de sedimentos			Comentario
	Capacidad de transporte de fondo (Ecuación de Meyer-Peter, 1949, 1951)	Capacidad de transporte suspendida (Ecuación de Van Rijn, 1984)	Capacidad de transporte de sedimentos total	
Planta de potabilización de Hidrocentro (antigua)	0,00276 m ³ /s.m	0,000516 m ³ /s.m	0,003276 m ³ /s.m	El 84,25% de la capacidad de transporte de sedimentos total está asociada a la capacidad de carga de lecho y un 15,75% a la capacidad de carga suspendida
Planta de potabilización de Hidrocentro (nueva)	0,0003444 m ³ /s.m	0,00008585 m ³ /s.m	0,000430 m ³ /s.m	La carga de lecho representa un 80,05% de la capacidad total, mientras que un 19,95% está asociado a la capacidad de carga suspendida
Aguas abajo del Puente La Cañita 1	0,0003393 m ³ /s.m	0,00002645 m ³ /s.m	0,000366 m ³ /s.m	La carga de lecho representa un 92,77% de la capacidad de transporte total y solo un 7,23% está asociado a carga suspendida
Aguas abajo del Puente La Cañita 2	0,0003576 m ³ /s.m	0,000077406 m ³ /s.m	0,000435 m ³ /s.m	La carga suspendida representa un 17,79% de la capacidad total de sedimentos y 82,21 % está asociada a carga de lecho

Fuente: Esqueda (2018)

La revisión de literatura y de trabajos similares realizados en otras latitudes del planeta ha permitido encontrar aseveraciones como, que la mayoría de las fórmulas del transporte sólido basadas en las mediciones realizadas en terreno (con caudales hasta 2,14 m³/s) tienden a sobrestimar la producción de sedimentos, siendo la excepción las fórmulas propuestas por Van Rijn y Bathurst *et al.* (Iroumé y Uyttendaele, 2009). Otras argumentaciones que conllevan a tomar los resultados obtenidos como una primera aproximación, es que la mayoría de los modelos disponibles consideran el transporte de sedimentos como un proceso constante y unidimensional, sobre todo porque fueron desarrollados a partir de experimentos en canales de ensayos bajo condiciones hidráulicas constantes y con sedimento uniforme (Batalla y Sala, 1996). Bajo estos escenarios, es importante indicar que la variabilidad espacial y temporal del transporte de sedimento es, por el contrario, una característica de los procesos de transporte fluviales, ya que el transporte en equilibrio raramente se produce en ríos naturales.

4.1.4. Estudio de las principales características estables del río Tinaco en el tramo comprendido desde el sector El Topo hasta el puente La Cañita, empleando teoría de régimen, apoyada en los métodos de Lacey, Blench, Simons - Albertson y Kondap

Los datos empleados en cada una de las determinaciones realizadas son los siguientes:

Caudal (Q): 1,8339 m³/s; Diámetro medio (Dm): 0,0074 m; Radio Hidráulico (R): 0,4596 m; Perímetro mojado (P): 16,4958 m; Área (A): 7,5808 m²; Velocidad media (U): 1,3074 m/s; Coeficiente de rugosidad de maninng (n): 0,0793; Pendiente hidráulica (S): 0,0075; Temperatura del agua (T): 20°C; Viscosidad cinemática (ν): 1,00667x10⁻⁶ m²/s; Densidad de los sedimentos (γs): 2871,485 Kg/m³; Concentración de los sedimentos arrastrados en la capa de fondo (C): 26,813 ppm; Fondos y orillas de gravas finas; Relación de talud utilizada (k): 2 H : 1 V; k= 2

A continuación se muestran las principales características estables del río Tinaco en el tramo estudiado (sector el Topo – puente La Cañita), aplicando Teoría de régimen apoyada en los métodos de Lacey, Blench, Simons – Albertson y Kondap. Método de Lacey

Factor de Sedimentación (f): 4,3528

Ancho de la superficie libre del agua (B): 6,5422 m

Tirante medio (dm): 0,3553 m

Área (A): 2,3244 m²

Si se desea diseñar un canal trapecial se tiene:

Tirante (d): 1,3297 m

Plantilla (b): 1,2234 m

Perímetro mojado (P): 7,1700 m

Radio hidráulico (R): 0,3242 m

Pendiente (S): 0,0034

Velocidad media (V): 0,7890 m/s

Coefficiente de rugosidad de maninng (n): 0,0275

Método de Blench

Factor de fondo (Fb): 6,833

Fbo: 5,1700

Ancho medio de la sección (bm): 20,26 m

Tirante de la corriente (d): 0,16 m

Factor K empleado en el cálculo de la pendiente hidráulica (K): 1.124

Pendiente hidráulica (S): 0,00099

Diseño de una sección trapecial

Ancho superficial (B): 20,58 m

Plantilla (b): 19,94 m

Área (A): 3,24 m²

Velocidad media (U): 0,566 m/s

Perímetro mojado (P): 20,656 m

Radio hidráulico (R): 0,157 m

Coefficiente de rugosidad de maninng (n): 0,016

Método de Simons – Albertson

Contantes adicionales (canal con fondo y orillas de gravas finas, condición 4);
valores tomados de la tabla 1.

K1: 3,16; K2: 0,27; K3: 10,76; K4: 0,85; m' : 0,286

Perímetro mojado (P): 4,31 m

Radio hidráulico (R): 0,336 m

Área (A): 1,448 m²

Velocidad media (U): 1,267 m/s

Valor de ε : 4,472

Tirante (d): 0,454 m

Plantilla (b): 2,30 m

Ancho superficial (B): 4,116 m

Ancho medio (bm): 3,208 m

Número de Reynolds (R): 571.407

Pendiente hidráulica (S): 0,00005

Coefficiente de rugosidad de maninng (n): 0,0027

Método de Kondap

Parámetros adicionales:

Densidad del sedimento (γ_s): 2871,485 Kg/m³

Densidad del agua (γ): 998,20 Kg/m³; para una temperatura de 20°C

Densidad relativa de las partículas sumergidas (Δ): 1,877

Ancho superficial (B): 4,726 m

Tirante medio (dm): 0,444 m

Área (A): 2,098 m²

Velocidad media (U): 0,874 m/s

Pendiente hidráulica (S): 0,0033

Diseño de una sección trapecial:

Tirante (d): 0,593 m

Plantilla (b): 2,354 m

Perímetro mojado (P): 5,06 m

Radio hidráulico (R): 0,415 m

Coefficiente de rugosidad de maninng (n): 0,037

La tabla 9 muestra un resumen de los parámetros obtenidos en cada método.

Tabla 9
Resumen de los parámetros obtenidos de la aplicación de cada método (Teoría de régimen)

Métodos de la Teoría de Régimen							
Lacey		Blench		Simons-Albertson		Kondap	
Parámetro	Parámetro	Parámetro	Parámetro	Parámetro	Parámetro	Parámetro	
Factor de Sedimentación (f):	4,3528 m	Factor de fondo (Fb):	6,833	K1:	3,16	Densidad del sedimento (γs):	2871,485 Kg/m ³
Ancho de la superficie libre del agua (B):	6,5422 m	Fbo:	5,1700	K2:	0,27	Densidad del agua (γ):	998,2 Kg/m ³
		Ancho medio de la sección (bm):	20,26 m	K3:	10,76	Densidad relativa de las partículas sumergidas (Δ):	1,877
Tirante medio (dm):	0,3553 m	Tirante de la corriente (d):	0,16 m	K4:	0,85	Ancho superficial (B):	4,726 m
Área (A):	2,3244 m ²	Factor K empleado en el cálculo de la pendiente					
Tirante (d):	1,3297 m	hidráulica (K):	1,124	m':	0,286	Tirante medio (dm):	0,444 m
Plantilla (b):	1,2234 m	Pendiente hidráulica (S):	0,00099	Perímetro mojado (P):	4,31 m	Área (A):	2,098 m ²
Perímetro mojado (P):	7,17 m	Ancho superficial (B):	20,58 m	Radio hidráulico (R):	0,336 m	Velocidad media (U):	0,874 m/s
Radio hidráulico (R):	0,3242 m	Plantilla (b):	19,94 m	Área (A):	1,448 m ²	Pendiente hidráulica (S):	0,0033
Pendiente (S):	0,0034	Área (A):	3,24 m ²	Velocidad media (U):	1,267 m/s	Tirante (d):	0,593 m
Velocidad media (V):	0,789 m/s	Velocidad media (U):	0,566 m/s	Valor de ε:	4,472	Plantilla (b):	2,354 m
Coefficiente de rugosidad de manning (n):	0,0275	Perímetro mojado (P):	20,656 m	Tirante (d):	0,454 m	Perímetro mojado (P):	5,06m
		Radio hidráulico (R):	0,157 m	Plantilla (b):	2,3 m	Radio hidráulico (R):	0,415 m
		Coefficiente de rugosidad de manning (n):	0,016	Ancho superficial (B):	4,116 m	Coefficiente de rugosidad de manning (n):	0,037
				Ancho medio (bm):	3,208 m		
				Número de Reynolds (R):	571.407		
				Pendiente hidráulica (S):	0,00005		
				Coefficiente de rugosidad de manning (n):	0,0027		

Fuente: Esqueda (2018)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓN

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se desprenden de la investigación son:

1. Los principales parámetros morfológicos y fluviales del río Tinaco en el tramo comprendido del sector El Topo hasta el puente La Cañita son: los sedimentos de fondo presentan una densidad promedio de 2871,485 Kg/m³, la porosidad es de 0,386 esto implica que los sedimentos cuentan con un 38,6% de poros, en el tramo estudiado existe riesgo de acorazamiento ya que la desviación estándar geométrica (C_g) es en promedio 3,517, la carga de lavado estimada es de 246,8 mg/l, el factor de fricción de Darcy es igual a 0,0584, el esfuerzo de fricción superficial se estimó en 19,6242 N/m², mientras que el esfuerzo cortante de forma de lecho se estima en 12,9996 N/m², la forma de lecho predominante es dunas; por ultimo en las condiciones analizadas la corriente es capaz de mover el D₅₀ y los granos del menor tamaño. Con respecto a la clasificación del río Tinaco en el tramo estudiado, éste se corresponde con un río de planicie poco caudaloso (clasificación por tramos propuesta por Lojtin, relación D₅₀ / S₀ = 1,0864; Número de froude, Fr = 0,056). En el mismo orden de ideas, la clasificación de acuerdo al material de las márgenes y el fondo, el tramo estudiado se clasifica como no cohesivo con predominio de grava y arena, es acorazado ya que la desviación estándar geométrica $\sigma_g > 3$ lo que indica que es bien graduado o de granulometría extendida; y por geometría, el tramo estudiado se considera altamente sinuoso, este hallazgo se apoyó en los valores obtenidos de sinuosidad (S) que oscilan entre 2,5 y 3,5.

2. El río Tinaco en los sectores estudiados, presenta una capacidad de transporte de sedimentos total dominada en gran medida, por la capacidad de transporte de fondo, esto puede inferirse en función a los valores estimados mediante los modelos empíricos utilizados en cada caso; los cuales superan el 50% de la capacidad de transporte total. Esto permite deducir que el lecho del río Tinaco en los sectores estudiados tenderá a erosionarse.

3. El comportamiento del cauce aluvial es a menudo estocástico (probabilístico); pueden predecirse las tendencias probables (estados medios), pero no las condiciones instantáneas individuales. La modelización determinística podría ser factible incluso a nivel de microcuencas, pero la recopilación de datos durante un período suficientemente representativo impone en este caso serias limitaciones prácticas.

Las teorías de régimen y, en general, de ajuste dinámico a los cauces están principalmente basadas en relaciones empíricas entre variables dependientes referidas a la geometría hidráulica y variables independientes definidas por las condiciones de la corriente y transporte de sedimentos. La teoría de régimen incluye a la vez supuestos espaciales y temporales. Los primeros son supuestos racionales: el cauce experimenta las modificaciones para acomodar el caudal dominante. Los supuestos temporales hacen referencia a las escalas de tiempo consideradas en el desarrollo y validación de cada modelo. El concepto de régimen se aplica normalmente a la escala temporal de ingeniería, o sea a períodos en que se elaboran proyectos de esta índole, con duración suficiente para establecer una base de datos de tasas y direcciones de cambio de un cauce natural. Y, sin embargo, está claro que para tales períodos existen inconsistencias sistemáticas en la consideración de una forma de cauce en equilibrio, incluso dinámico.

Uno de los avances más radicales en este ámbito se ha producido recientemente en el desarrollo de una metodología analítica y racional.

Esta nueva aproximación responde a una descripción teórica de los procesos fluviales dominantes más que a un tratamiento puramente empírico. No obstante, queda todavía mucho por hacer en el afianzamiento de una teoría como ésta que relaciona que relaciona el tamaño y la forma del cauce con los diferentes procesos físicos implicados. Aunque se han conseguido importantes progresos al combinar ecuaciones que describen el transporte de sedimentos y la fricción aluvial, todavía hoy no se conoce una solución definitiva al problema de determinar la anchura de los cauces en régimen.

El rango de aplicación de la teoría de régimen ha ido creciendo ininterrumpidamente de canales a cursos naturales de lechos de arena y, posteriormente, a ríos con lechos de grava.

En tal sentido, los estados de equilibrio constituyen en conjunto un período de redefinición. En un proceso de reajuste dinámico del cauce a nuevas condiciones medioambientales, la inestabilidad es transitoria, pero también necesaria para alcanzar dichos estados. Tal adaptación no se produce de forma inmediata, requiere lustros e incluso décadas para ser completada. Por otra parte la alteración puntual del sistema puede tener efectos importantes dentro de un contexto espacial más amplio.

Los cambios originados aguas arriba influyen aguas abajo con un retardo temporal causa-efecto, especialmente en los tramos medio e inferior de los cursos fluviales. Con frecuencia estos cursos atraviesan fases transitorias y se hallan sometidos a continuos cambios. Establecer si un río está ya ajustado, o se está adaptando a nuevos controles, así como conocer la naturaleza y magnitud probable de una futura modificación del cauce, son aspectos de particular interés para los ingenieros encargados de planificar la actuación sobre este tipo de sistemas.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda la realización de nuevos trabajos tanto en el río Tinaco como en otros ríos del estado Cojedes, donde se apliquen la teoría de régimen y otros métodos como por ejemplo el de Altunin y Maza-Cruickshank.

REFERENCIAS

- Batalla R. J. y Sala M. 1996. Aplicación de modelos de transporte de sedimento en un río permanente con granulometría dispersa. IV Reunión de Geomorfología Grandal d' Anglade, A. y Pagés Valcarlos, J., Eds. 1996, Sociedad Española de Geomorfología O Castro (A Coruña). [Documento en línea]. En: <http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/2183/6233/1/CA-21-14.pdf>. [Consulta: Julio 15, 2016]
- Bravo Granda, J., & León Cadena, N. (2011). Metodología para la estabilización del cauce de un río de llanura para la protección de puentes/Johanna Bravo Granda; Néstor León Cadena. [Documento en línea]. En: <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/7876/9.80.001293.pdf?sequence=4&isAllowed=y>. [Consulta: Agosto 12, 2016]
- Chanson H. 2002. Hidráulica de flujos en canales abiertos. Mc Graw Hill, Bogotá D.C., Colombia. Pp. 167-280.
- García Conesa, C., & Pérez Cutillas, P. (2014). Alteraciones geomorfológicas recientes en los sistemas fluviales mediterráneos de la Península Ibérica: Síntomas y problemas de incisión en los cauces. *Revista de Geografía Norte Grande*, (59), 25-44. [Documento en línea]. En: <http://www.scielo.cl/pdf/rgeong/n59/art03.pdf>. [Consulta: Agosto 12, 2016]
- Garde R., J. 2006. *River Morphology*. New Age International (P) Limited, Publishers. New Delhi, India.
- Lamariano Garagarza, I. (2012). Estudio de la dinámica fluvial, transporte de sedimentos y estabilidad del Río Blanco, provincia de Salta (Argentina). [Documento en línea]. En: <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/22599/MEMORIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Consulta: Agosto 12, 2016]
- Guzmán, R., Bezada, M., & Rodríguez, I. (2013). Cambios de canal durante los últimos 60 años en el sistema anastomosado del curso medio del río Apure, Venezuela. *Interciencia*, 38(9), 642. [Documento en línea]. En: <http://crawl.prod.proquest.com.s3.amazonaws.com/fpcache/d8f6a7d3d872d99f5dc50081e8bdd0e9.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJF7V7KNV2KKY2NUQ&Expires=1464726255&Signature=MGHYJB2Z60MeObehK50k9%2Fck5K8%3D>. [Consulta: Agosto 12, 2016]
- Hernández, R. Fernández, C. Baptista, P. 2010. *Metodología de la Investigación*. Editorial Mc Graw Hill 5ta. Edición, 613 pp.
- Iroumé A. y Uyttendaele P. 2009. Cuantificación del transporte de sedimentos mediante mediciones directas y el uso de modelos empíricos en una cuenca experimental de la Cordillera de Los Andes, Sur de Chile. *Revista Técnica de*

- Ingeniería Universidad del Zulia, Volumen 32, N° 2, 143 – 151, 2009. [Documento en línea]. En: <http://www.scielo.org.ve/pdf/rtfiuz/v32n2/art07.pdf>. [Consulta: Mayo 10, 2016]
- Maza-Alvarez, J. A. y García-Flores, M. (1996). Transporte de Sedimentos. Capítulo 10 Manual de Ingeniería de Ríos. Series del Instituto de Ingeniería 584, UNAM, 531 pp.
- Maza-Alvarez, J. A. y García-Flores, M. (1996). Estabilidad de Cauces. Capítulo 12 Manual de Ingeniería de Ríos. Series del Instituto de Ingeniería 584, UNAM, 119 pp.
- Meyer-Peter E. 1949. Quelques problèmes concernant le charriage des matières solides (some problems related to bed load transport). Société Hydrotechnique de France. 2.
- Meyer-Peter E. 1951. Transport des matières solides en general et problem Spéciaux. Bulletin Génie Civil d'Hydraulique Fluviale. Tome 5.
- Narváez, R. 1997. Orientaciones Prácticas para la Elaboración de Informes de Investigación. 2da edición. Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre., Bolívar, Venezuela.
- Ojeda, A. O., Ferrer, D. B., Bea, E. D., Mur, D. M., Fabre, M. S., Naverac, V. A., ... & Gil, N. S. (2007). Un índice hidrogeomorfológico (IHG) para la evaluación del estado ecológico de sistemas fluviales. Geographicalia, (52), 113-142. [Documento en línea]. En: <file:///C:/Users/Computer/Downloads/Dialnet-UnIndiceHidrogeomorfologicoIHGParaLaEvaluacionDeLE-2566911.pdf>(IGH). [Consulta: Agosto 12, 2016]
- Peñalosa, O. A. y Arias, A. A. (2010). Estudio de las teorías de arrastre de fondo sobre el río negro, en un tramo de 100 m aguas arriba del puente Tobia – la montaña, mediante un modelo físico. Trabajo de grado. Universidad de la Salle facultad de ingeniería programa de ingeniería civil. BOGOTÁ D.C.
- Ramírez, T. (1999). Como Hacer un Proyecto de Investigación: Guía Práctica. Editorial Panapo, Caracas, Venezuela, 102 pp.
- Rivas, F. (1999). Estudio de anchos estables en ríos de montaña. Tesis de Maestría. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. Mérida – Venezuela.
- Rivera-Trejo, F., Uh-Us, F., Soto-Cortés, G., & Díaz-Flores, L. L. (2013). Inspección de cauces: guía de reconocimiento en campo. Tecnología y ciencias del agua, 4(2), 149-161.

- Rocha, A. 2006. Introducción a la Hidráulica Fluvial. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil; Perú.
- Rocha, A. (2006). La morfología fluvial y su incidencia en la estabilidad de las obras viales. VIII Congreso Internacional Obras de Infraestructura Vial. Instituto de la Construcción y Gerencia. [Documento en línea]. En:http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/ROCHA/Morfologia_fluvial_y_su_influencia.pdf. [Consulta: Agosto 12, 2016]
- Venezuela 1999. Constitución de la República Bolivariana de Venezuela. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N°36860 (Extraordinario). Caracas, diciembre, 30.
- Venezuela 2013. Asamblea Nacional de la República Bolivariana de Venezuela. Proyecto Nacional Simón Bolívar. Segundo Plan Socialista: Desarrollo Económico y Social de la Nación 2013-2019. Caracas. Venezuela 2013.[Documento en línea]. En:http://www.asambleanacional.gob.ve/uploads/botones/bot_90998c61a54764da3be94c3715079a7e74416eba.pdf. [Consulta: Mayo 12, 2016]