

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

***DESARROLLO DEL CONCEPTO DE ÁREAS DE INTERÉS
NAVEGABLE (AIN) PARA EL DISEÑO DEL CANAL DE NAVEGACIÓN
SOBRE EL EJE FLUVIAL ORINOCO-CASIQUIARE-NEGRO-
AMAZONAS***

Caso Estudio: río Casiquiare

Presentado ante la Universidad Católica Andrés Bello

Como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

Tesista:

Rondón Marmoto, Angelo Jesús

Tutor académico:

Prof. Christopher Mendoza

Caracas, noviembre de 2020

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

***DESARROLLO DEL CONCEPTO DE ÁREAS DE INTERÉS
NAVEGABLE (AIN) PARA EL DISEÑO DEL CANAL DE NAVEGACIÓN
SOBRE EL EJE FLUVIAL ORINOCO-CASIQUIARE-NEGRO-
AMAZONAS***

Caso Estudio: río Casiquiare

Este jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: **Veinte (20) puntos.**

JURADO EXAMINADOR


Nombre: Christopher Mendoza


Nombre: Roberto Savelli


Nombre: Luis Mirabal

Presentado ante la **Universidad Católica Andrés Bello**

Como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

Tesista:

Rondón Marmoto, Angelo Jesús

DEDICATORIA

A Dios, quien como guía estuvo presente en el caminar de mi vida, bendiciéndome y dándome fuerzas y sabiduría para superar todo obstáculo y continuar con mis metas trazadas.

A mis padres Eduardina y Nerio y mis hermanos Antonio y Nasly que con su apoyo incondicional y confianza me permitieron poder culminar esta etapa tan importante.

A mi abuela, a quien quise como una madre, por haberme brindado todo su cariño y apoyo, sé que este momento hubiera sido tan especial para ti como lo es para mí.

Angelo Rondón

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios por guiarme en mi camino y por permitirme concluir con éxito mi objetivo.

A mis padres, quienes a pesar de todas las dificultades no dejaron de confiar en mí y que gracias a sus fortalezas, virtudes y valores inculcados me convertí en la persona que soy hoy día.

A mi tutor, el Prof. Christopher Mendoza, quien con su experiencia, conocimiento y motivación me orientó en el desarrollo de esta investigación.

A la Universidad Católica Andrés Bello, por regalarme unos maravillosos años llenos de alegría, aprendizaje y crecimiento personal.

A mis amigos, con todos los que compartí dentro y fuera de las aulas, aquellos que se convierten en amigos de vida y aquellos que serán mis colegas, gracias por todo su ánimo y apoyo.

A mis profesores, gracias por su tiempo, su paciencia y por la sabiduría que me transmitieron en el desarrollo de mi formación profesional.

Angelo J, Rondón M

**DESARROLLO DEL CONCEPTO DE ÁREAS DE INTERÉS
NAVEGABLE (AIN) PARA EL DISEÑO DEL CANAL DE
NAVEGACIÓN SOBRE EL EJE FLUVIAL ORINOCO-CASIQUIARE-
NEGRO-AMAZONAS
Caso Estudio: río Casiquiare**

Tutor académico: Prof. Christopher Mendoza
Trabajo Especial de Grado. Caracas, Universidad Católica Andrés Bello, Facultad de
Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil. Año 2020, 71p.

Palabras clave: Área de Interés Navegable, río Casiquiare, navegación fluvial, telemetría
satelital, Sistema de Información Geográfica, canales de navegación.

RESUMEN

Las tres cuencas hidrográficas más grandes y relevantes de Suramérica son las del río Orinoco, Amazonas y de la Plata, las cuales presentan ríos naturalmente navegables y aptos para el transporte fluvial. Resultando de gran interés la integración de estas tres grandes cuencas hidrográficas a través de sus ríos principales y tributarios. Es un hecho que el río Amazonas une su cuenca con la del Orinoco a través del río Casiquiare, por lo tanto este último cumpliría un papel importante para el logro de la integración fluvial suramericana. Dado el limitado conocimiento que se tiene acerca del río Casiquiare se busca ampliar la información y el interés existente sobre éste, desarrollando un concepto dentro del área de la navegación fluvial denominado Áreas de Interés Navegable (AIN), realizando un análisis del río mediante el uso de telemetría satelital. Este concepto abarca tres criterios, geomorfológico, hidrosedimentario y poblacional, los cuales integrados permiten ensamblar un Sistema de Información Geográfica (GIS) del río. Basado en lo anterior, el Casiquiare es un curso de agua estable geomorfológicamente, su navegación requiere la adecuación del lecho, así como la rectificación de curvas cerradas; es un río que presenta variaciones hidrosedimentarias significativas y sus riberas y adyacencias se encuentran muy poco pobladas. Al ser datos necesarios para el diseño y desarrollo de una canal de navegación fluvial sintetizados en un GIS, las AIN representan una herramienta que otorga al diseñador del canal de navegación las bases de información preliminares del área de estudio.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	3
EL PROBLEMA.....	3
1.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2.- OBJETIVOS.....	5
1.2.1.- General.....	5
1.2.2.- Específicos.....	5
1.3.- JUSTIFICACIÓN.....	6
1.4.- ALCANCE Y LIMITACIONES.....	7
CAPÍTULO II.....	8
MARCO TEÓRICO.....	8
2.1.- Ríos.....	8
2.1.1.- Clasificación de los ríos.....	9
2.1.1.1.- Según su edad.....	9
2.1.1.2.- Según la condición de estabilidad.....	10
2.1.1.3.- Según el tramo.....	10
2.1.1.4.- Según los grados de libertad.....	11
2.1.1.5.- Según el material de las márgenes y del fondo.....	12

2.1.1.6.- Según el tiempo que transportan agua.....	12
2.1.1.7.- Según la pendiente	13
2.1.1.8.- Según la geometría	13
2.1.1.9.- Según las condiciones de transporte	14
2.1.2.- Morfología fluvial: formas en planta	15
2.1.3.- Vías fluviales.....	19
2.2.- Eje fluvial Orinoco-Casiquiare-Negro-Amazonas	21
2.2.1.- Raudales	23
2.2.2.- Río Casiquiare.....	25
2.2.2.1.- Origen y evolución del río.....	27
2.2.2.2.- Mediciones de descarga obtenidas en 1943	29
2.2.2.3.- Mediciones obtenidas en la expedición del año 2000	30
2.2.2.4.- Cuenca del río.....	32
2.2.3.- Propuestas de desarrollo del eje fluvial por parte del USACE (1943).....	33
2.3.- Imágenes satelitales.....	35
2.4.- Modelo Digital de Elevación (DEM).....	36
CAPÍTULO III	37
MARCO METODOLÓGICO	37
3.1.- Tipo de investigación	37
3.2.- Fases de la investigación	38
3.2.1.- Fase 1: Recopilación de información bibliográfica	39
3.2.2.- Fase 2: Selección de las AIN estableciendo previamente los criterios	39
3.2.3.- Fase 3: Aplicación de los criterios	40
3.2.4.- Fase 4: Construcción de un Modelo Digital de Elevación (DEM)	44
3.2.5.- Fase 5: Requerimientos técnicos	44

CAPÍTULO IV	46
RESULTADOS Y ANÁLISIS	46
CONCLUSIONES.....	66
RECOMENDACIONES	68
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXOS	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. II-1: Grados de libertad de un cauce	12
Figura. II-2: Planta y sección transversal de un cauce trenzado.....	16
Figura. II-3: Río entrelazado	16
Figura. II-4: Cauce meandriforme: morfología (planta y secciones transversales vistas en el sentido de la corriente) y evolución ideal de la línea media (derecha).....	17
Figura. II-5: Un río típico meándrico. Fuente: “Morfología Fluvial” (Rocha, 2009, p.7) ...	18
Figura. II-6: Meandros regulares, irregulares, simples y compuestos.....	18
Figura. II-7: Estrangulamiento o corte natural de un meandro y formación de lagos	18
Figura. II-8: Representación de un río trenzado y meandriforme	19
Figura. II-9: Ventajas del transporte fluvial	20
Figura. II-10: Cantidad de vías fluviales de Suramérica según el país (km).....	21
Figura. II-11: Tramos de río Orinoco	23
Figura. II-12: Vista satelital de los raudales de Atures (derecha) y Maipures (izquierda)...	25
Figura. II-13: Mapa de ubicación del río Casiquiare.....	26
Figura. II-14: Principales afluentes del río Casiquiare.....	26
Figura. II-15: Tendencias pasadas y futuras en la evolución del río	27
Figura. II-16: Vista satelital del río Casiquiare en la bifurcación (izquierda) y confluencia (derecha).....	30
Figura. II-17: Perfiles batimétricos obtenidos en las seis secciones del río por medio de una ecosonda (Eagle Strata 128), profundidades y anchos en metros.....	30
Figura. II-18: Cuencas del río Casiquiare y Alto Orinoco	32
Figura. III-1: Diagrama de las fases de la investigación	38
Figura. IV-1: Visualización de las Áreas de Interés Navegable.....	47
Figura. IV-2: Márgenes del AIN1	49
Figura. IV-3: Márgenes del AIN2	49
Figura. IV-4: Márgenes del AIN3	49
Figura. IV-5: Márgenes del AIN4	50
Figura. IV-6: Márgenes del AIN5	50
Figura. IV-7: Márgenes del AIN6	50
Figura. IV-8: Contraste AIN1, períodos 2000-2013 y 2013-2020	51

Figura. IV-9: Contraste AIN2, período 2000-2020	52
Figura. IV-10: Contraste AIN3, período 2000-2020	53
Figura. IV-11: Contraste AIN4, períodos 2000-2013 y 2013-2020	54
Figura. IV-12: Contraste AIN5, períodos 2000-2013 y 2013-2020	56
Figura. IV-13: Contraste AIN6, período 2000-2020	57
Figura. IV-14: Zonas dinámicas y estables de las AIN	57
Figura. IV-15: Mediciones representadas en las AIN1 y AIN2	59
Figura. IV-16: Poblaciones en las AIN	61
Figura. IV-17: Poblaciones enumeradas de las AIN2 y AIN6	62
Figura. IV-18: Modelo Digital de Elevación de la zona de estudio	63
Figura. IV-19: Visión detallada de las AIN en el Modelo Digital de Elevación.....	64
Figura. IV-20: Integración de los criterios	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II-1: Clasificación propuesta por Lojtin según la ubicación del tramo	11
Tabla II-2: Relación de forma con el índice de sinuosidad P.....	14
Tabla II-3: Clasificación según Schumm (1963).....	15
Tabla II-4: Navegación del río Orinoco	22
Tabla II-5: Mediciones de descarga y velocidad realizadas en marzo de 1943 por el USACE.....	29
Tabla II-6: Datos hidrológicos y fisicoquímicos obtenidos en el año 2000.....	31
Tabla III-1: Características de los satélites Landsat 7 y Landsat 8	41
Tabla IV-1: Características de las imágenes satelitales descargadas	48

INTRODUCCIÓN

El continente suramericano dispone de una amplia red de cuencas, vías fluviales y regiones hidrográficas, tanto nacionales como internacionales, de una enorme potencialidad en recursos naturales, que brindan oportunidades reales para impulsar y promover el crecimiento productivo, comercial, turístico y social.

En lo que respecta al ámbito territorial de las cuencas hidrográficas situadas en este continente, las tres más relevantes son la del Orinoco, Amazonas y del Plata, las cuales cubren, en valores aproximados, alrededor de 11.000.000 km² y otras cuencas más pequeñas, pero no menos importantes, alcanzan los 2.000.000 km². En este sentido, si se considera que el continente suramericano cuenta con un territorio total de 18.000.000 km² aproximadamente, significa que un poco más del 70% del continente está constituido por cuencas hidrográficas con ríos naturalmente navegables. Por consiguiente, se puede decir que existe un sistema incipiente suramericano de navegación fluvial que tiene como propósito la interconexión de los ríos de estas tres grandes cuencas, y que junto a sus tributarios constituyen miles de kilómetros aptos para el transporte fluvial.

Las cuencas están delimitadas por las llamadas divisorias de aguas, ya que las aguas corren para un lado o para el otro de cualquier cordillera. Por eso, las cuencas nunca se unen, a excepción del caso del sistema Orinoco-Amazonas. En efecto, el río más largo y caudaloso, el Amazonas, une su cuenca con la del Orinoco a través del río Casiquiare. Por lo tanto este río representaría un rol importante en el sistema suramericano de navegación fluvial mencionado anteriormente.

El Casiquiare se encuentra situado en el estado Amazonas. Toma sus aguas de la margen izquierda del río Orinoco y las lleva, a través de una extensa llanura selvática de escaso desnivel, haciendo grandes meandros, hasta unirse con el Guanía para formar el río Negro, el más caudaloso de los afluentes del Amazonas, al cual va a unirse a la altura de la ciudad de Manaus, en Brasil.

Con esto en mente, este trabajo de investigación pretende dividir el río Casiquiare en lo que sería un nuevo concepto en el área de navegación fluvial denominado Áreas de Interés Navegable (AIN), según ciertos criterios o parámetros que serán seleccionados más

adelante, desarrollando así los requerimientos técnicos necesarios para elaborar un Sistema de Información Geográfica (GIS) de estas AIN. Para lograr esto, será necesario realizar un análisis del río haciendo uso de imágenes satelitales que abarquen las áreas que se trabajarán.

De igual manera se busca ampliar la información y el interés existente sobre este río único en el mundo, ya que su conocimiento es generalmente limitado, subjetivo e incompleto debido a las escasas mediciones hidráulicas e hidrológicas que se tienen de él. Cabe destacar que una de las últimas mediciones realizadas fue en septiembre del año 2000 en una expedición realizada por Alain Laraque y Paul Georgescu, en donde se midieron únicamente la bifurcación y la confluencia del río. Esto posiblemente está sujeto a que el Casiquiare es un curso de agua muy aislado, ubicado en un entorno en donde hay poca población ribereña, además de presentar cierto grado de inseguridad debido a actividades mineras ilegales (Laraque, Lopez, Yepes y Georgescu, 2019).

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde mucho antes de la llegada de los españoles al actual territorio venezolano, los indígenas del sur del país utilizaron los ríos como vía fundamental para su traslado y para el transporte de sus alimentos y productos.

En el río Casiquiare se produce un fenómeno hidrológico similar a la denominada captura fluvial, consistente en la conexión natural de los ríos Orinoco y Negro. Las aguas de este río recorren alrededor de 356 km por una penillanura, fluyendo hacia Brasil, para juntarse con el río Guainía y dar nacimiento al río Negro, afluente del Amazonas.

Con respecto al descubrimiento del río Casiquiare y de sus primeros exploradores se sabe que los conquistadores españoles se enteraron de su existencia por parte de los nativos durante el siglo XVII. El primer relato de esta conexión hidrológica se le atribuye al padre Cristóbal de Acuña en el año 1641, donde le hace mención en su trabajo titulado "Nuevo descubrimiento del gran río de las Amazonas". El padre jesuita Manuel Román, superior de las misiones españolas, realizó un viaje en 1744 donde confirmó la existencia de este paso natural entre estas dos grandes cuencas fluviales de América. Posteriormente fue explorado en 1755 por José de Iturriaga y José Solano. Unos años después aparecerían en la misma escena dos viajeros científicos que cambiaron la imagen de América en Europa, éstos son Alexander von Humboldt y Aimé Bonpland quienes en 1800 navegaron el río Casiquiare confirmando y cerrando la controversia sobre su existencia, momento desde el cual ha sido definitivamente aceptada por la comunidad científica moderna.

Al terminar la guerra de independencia, durante el resto del siglo XIX y buena parte del siglo XX, la navegación por el mar y los ríos constituyó la forma más importante de comunicación en Venezuela.

En 1943, durante la Segunda Guerra Mundial, el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de EE.UU. realizó el primer estudio hidrológico para la navegabilidad en este canal con el fin

de desarrollar una ruta segura para el transporte de látex entre Brasil, Colombia y Venezuela, para propósitos de guerra (Laraque et al.).

Entre los años 1979 y 1980 un hito relevante lo constituyó el viaje que realizaron los hermanos Paul y Constantino Georgescu desde el Orinoco hasta el río de la Plata y viceversa, atravesando las tres cuencas en una expedición denominada “Oriampla”, una travesía de aproximadamente 11.000 km donde pudieron constatar que es posible la navegación fluvial por el continente en más de un 90% de su longitud.

Más recientemente, en el año 2000 se realizó otra expedición (la última conocida) llamada “200 años del descubrimiento del río Casiquiare por Humboldt y Bonpland” cuya travesía fue de alrededor de 300 km en donde se realizaron en algunas zonas del río Casiquiare pruebas de agua y mediciones del río.

El presente Trabajo Especial de Grado está orientado a desarrollar un concepto dentro del ámbito del diseño de canales de navegación fluvial, denominado como Áreas de Interés Navegable (AIN), enfocado en la zona de estudio, proporcionando un recurso importante para posteriormente un posible diseño del canal de navegación. De esta manera el río Casiquiare cumpliría un papel de gran importancia en el logro de la integración fluvial y la correspondiente puesta en funcionamiento de un Sistema Suramericano de Navegación conectando las Cuencas Hidrográficas del Orinoco, del Amazonas y del Plata.

1.2.- OBJETIVOS

1.2.1.- General

Desarrollar el concepto de Áreas de Interés Navegable (AIN) para el diseño del canal de navegación sobre el eje fluvial Orinoco-Casiquiare-Negro-Amazonas, Caso de estudio: río Casiquiare.

1.2.2.- Específicos

- Definir las Áreas de Interés Navegable (AIN) ajustadas al diseño de canales de navegación fluvial en la zona de estudio.
- Contrastar la evolución de las Áreas de Interés Navegable (AIN) empleando telemetría satelital.
- Integrar las Áreas de Interés Navegable (AIN) con un Modelo Digital de Elevación (DEM).
- Establecer los requerimientos técnicos para ensamblar un Sistema de Información Geográfica (GIS) acorde al concepto de Áreas de Interés Navegable (AIN).

1.3.- JUSTIFICACIÓN

El desarrollo sostenible requiere transportes seguros, amigables para el ambiente, baratos y confiables, por lo cual la navegación fluvial se ha impuesto desde siempre, teniendo así un impacto significativo sobre varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) expresados en la agenda de 2030 adoptada por la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

En este sentido, Suramérica se encuentra beneficiada por la interconexión natural que genera el río Casiquiare. Así Venezuela, Colombia y Brasil se pueden comunicar, favoreciendo el transporte, las comunicaciones y el desarrollo económico y social del gran territorio. Cabe destacar el hecho de que los mercados de esta zona, especialmente aquel de Manaos, representan un foco importante para la producción en las industrias del sur de Venezuela, con miras a la exportación de productos, y como alternativa para ello es necesario que la vía del Casiquiare se desarrolle.

Dicho esto, la investigación sirve de base para próximas investigaciones que se desarrollen en la zona, relacionadas con la navegación fluvial, promoviendo e incentivando el estudio de esta alternativa de conexión.

1.4.- ALCANCE Y LIMITACIONES

Para efectos de este Trabajo Especial de Grado, el alcance va destinado a proporcionar los requerimientos técnicos necesarios para ensamblar un Sistema de Información Geográfica (GIS) referente a las AIN del río Casiquiare, por lo tanto no se va a diseñar el canal de navegación, más bien se va a aportar un recurso importante de información para futuros proyectos, dentro de los cuales puede ser un posible diseño del canal. Cabe destacar que **todo el tramo del río es de interés navegable**, sin embargo, debido a lo extenso que es en toda su trayectoria, se van a seleccionar las AIN, estableciendo previamente los criterios de selección.

Las posibles limitaciones podrían ser la resolución espacial de los satélites, haciendo referencia a la finura de detalles visibles en las imágenes satelitales, cuya distancia está alrededor de 15m a 30m, sabiendo que hay mayor resolución cuanto menor es esta distancia; otra limitación posible serían las escasas mediciones, tanto hidrológicas como batimétricas, que se tienen del río lo cual puede afectar a los criterios de selección.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se desarrollan las bases teóricas en las cuales se apoya esta investigación. En primer lugar, se hará mención a lo que conceptualmente es un río, incluyendo todas sus características y clasificaciones, ya que representan la vía principal en la cual se desenvuelve la navegación fluvial, área en la cual se está trabajando. En segundo lugar, se verá todo lo correspondiente al eje fluvial Orinoco-Casiquiare-Negro-Amazonas, haciendo énfasis en el río Casiquiare. Por último, se tocarán temas conceptuales de lo que representan las imágenes satelitales y los Modelos Digitales de Elevación (DEM).

2.1.- Ríos

Juan Martín Vide (2002) en su libro titulado como “Ingeniería de Ríos” describe al río como un elemento natural que recoge las aguas de una cuenca y las transporta en lámina libre hasta su desembocadura. En otras palabras, se podría decir que es una corriente natural de agua que fluye con continuidad, por el efecto de la gravedad de un lugar elevado a otro más bajo para culminar su recorrido en otra masa de agua, bien sea en otro río, en mares u océanos.

El caudal, definido como el volumen de agua que circula por una sección en un lugar y tiempo determinado, es uno de los aspectos que definen al río. Debido a las irregularidades que presentan las secciones de estos últimos, el caudal es siempre variable y depende del régimen hidrológico de la cuenca. Como bien se sabe, este régimen puede presentar fenómenos extraordinarios (crecidas), relacionados con precipitaciones infrecuentes, los cuales en algunas ocasiones cambian el curso o recorrido del río, bien sea de manera gradual o de manera radical. De igual forma los ríos siempre buscan un punto de equilibrio o cierto acomodo, teniendo así un trazado sinuoso y no alineaciones rectas.

Los ríos mantienen una estrecha relación con el medio por donde circulan sus aguas, creando en sus alrededores un medio físico apropiado para la vida vegetal y animal. Por lo tanto el cauce representa otro aspecto característico del río, ya que es este medio natural por

el cual fluyen las aguas del mismo. En su análisis intervienen dos características principales, las cuales son el perfil transversal y el perfil longitudinal, el primero indicaría el fondo del cauce entre una margen y otra y el segundo indica el thalweg o vaguada (la parte más profunda del cauce) desde el nacimiento hasta su desembocadura.

Normalmente cuando se habla del caudal de un río, viene a la mente el caudal líquido, pero también está presente el caudal sólido, por lo tanto se podría decir que el río es un medio bifásico de agua y sedimento, los cuales pueden variar en el tiempo y a lo largo de su recorrido. Estas variaciones hacen que el río busque nuevamente su equilibrio generando así modificaciones en el cauce (erosión, sedimentación, cambios en la forma del fondo, etc.).

2.1.1.- Clasificación de los ríos

La clasificación de los ríos se realiza desde diferentes puntos de vista, permitiendo de esta manera ubicar fácilmente cualquier cauce para determinar sus principales características. Sin embargo, conviene tener en cuenta que en la naturaleza se puede presentar cualquier condición intermedia entre las definidas en una de estas clasificaciones.

2.1.1.1.- Según su edad

En esta clasificación entran los ríos jóvenes, maduros y viejos. Los jóvenes se encuentran en cauces de montaña, son muy irregulares con pendientes elevadas, poseen una sección transversal en forma de “V” y están generalmente en procesos de degradación.

Los ríos maduros se presentan en valles amplios con pendientes relativamente bajas, la erosión de las márgenes ha reemplazado a la erosión de fondo de los ríos jóvenes, suelen ser estables y la sección transversal de cada tramo es capaz de transportar la carga de sedimento en todo su recorrido.

Los ríos viejos se encuentran en valles amplios y planicies cuyo ancho es 15 a 20 veces mayor que el ancho de los meandros, las pendientes son muy reducidas generando depósitos naturales de sedimentos en las márgenes. Frecuentemente se encuentran zonas pantanosas con formas de herradura que son restos de meandros abandonados que fueron cortados en forma natural.

2.1.1.2.- Según la condición de estabilidad

Aquí existen cuatro tipos, los cuales se mencionan a continuación:

- Estabilidad estática: es cuando la corriente es capaz de arrastrar sedimentos pero no puede mover las partículas o elementos de las orillas. Pertenecen a este tipo, por ejemplo, los tramos de ríos en que las márgenes son rocosas o tienen una cohesión muy alta.
- Estabilidad dinámica: cuando las variaciones de la corriente, los materiales del fondo y de las márgenes y los sedimentos transportados han formado una pendiente y una sección transversal que no cambian apreciablemente en el tiempo. En estas condiciones, el río sufre desplazamientos laterales continuos en las curvas, con erosiones en las márgenes exteriores y depósito de sedimento en las interiores. Todos los caudales, antes de producirse un desbordamiento, escurren por un único cauce que no tiene islas o bifurcaciones.
- Inestabilidad dinámica: el río escurre por un solo cauce, como en el caso anterior, pero se presenta cuando el desplazamiento lateral de los meandros es muy intenso y por lo tanto, el corte natural de estos es frecuente. Por una parte, el río trata de alcanzar su pendiente de equilibrio al desarrollar sus meandros y por otra, éstos se estrangulan rápidamente y se cortan, a causa de esto, el tramo del río no alcanza a estabilizar su pendiente.
- Estabilidad morfológica: cualquier corriente natural no alterada por factores humanos tiene estabilidad morfológica. Un cauce que en forma natural tiene estabilidad estática o dinámica, también tiene la morfológica.

2.1.1.3.- Según el tramo

Esta clasificación depende de una relación entre el diámetro (D) de las partículas de fondo, expresadas en metros, con la pendiente (S) del cauce expresada en m/m y del número de Froude (Fr). En la tabla que se presenta a continuación se encuentra esta clasificación:

Tabla II-1: Clasificación propuesta por Lojtin según la ubicación del tramo

Denominación	D/S	Fr
Alta Montaña	> 10	> 1
Montaña	> 7	0.7 a 1
Faldeo o Piedemonte	> 6	0.45 a 0.7
Intermedio	> 5	0.2 a 0.45
Planicie (con cauce arenoso)		
Río Caudaloso	> 2	0.44 a 0.55
Río poco Caudaloso	> 1	0.14 a 0.44

Fuente: “Cátedra de obras hidráulicas: Obras Fluviales” (n.d, p.15)

2.1.1.4.- Según los grados de libertad

Los grados de libertad se expresan como GL y se refieren a la forma de respuesta de un cauce ante una variación en el caudal. Existen tres grados posibles:

- 1GL: se dice de un curso de agua en el cual al variar el caudal, solo varía el tirante de agua. Aquí no existe transporte de sedimentos, por lo cual, la sección transversal es estable. Un ejemplo de este tipo sería un curso de agua que tenga un suelo duro, eventualmente roca, o que se encuentre revestido.
- 2GL: cuando sólo varía el tirante y la pendiente. Se pueden encontrar cursos de agua de este tipo cuando sus márgenes son muy resistentes (rocosas) y el fondo no (arenoso).
- 3GL: cuando además del tirante y la pendiente con el cambio del caudal también pueden alterarse las márgenes, es decir, el ancho del cauce, por ejemplo la mayoría de los cauces naturales que escurren sobre materiales aluviales.

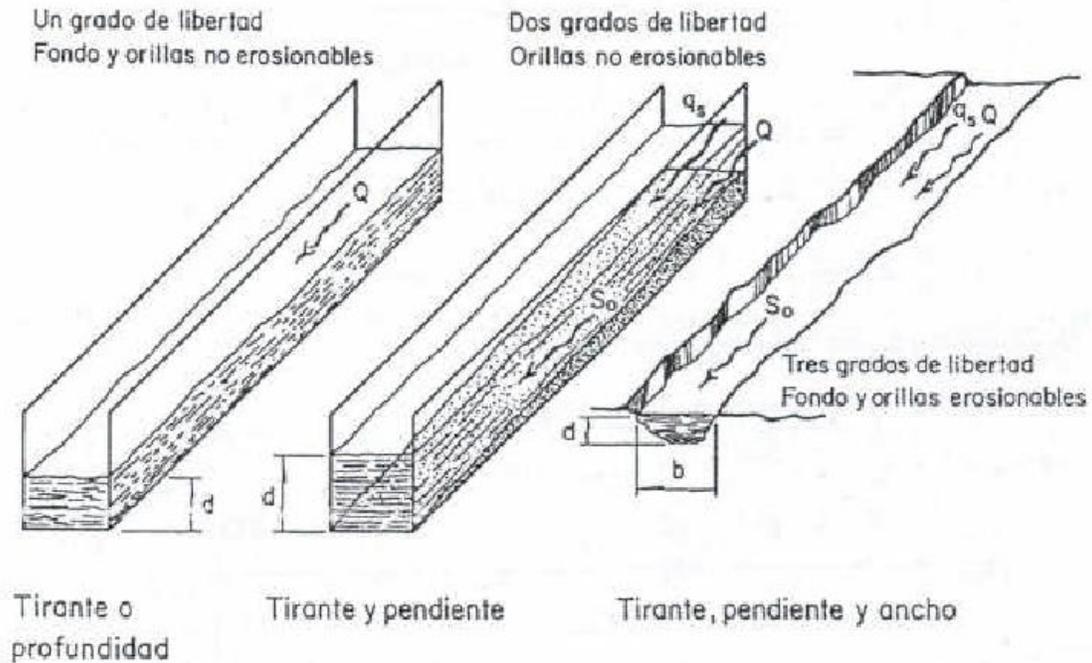


Figura. II-1: Grados de libertad de un cauce.

Fuente: "Cátedra de obras hidráulicas: Obras fluviales" (n.d, p.16)

2.1.1.5.- Según el material de las márgenes y del fondo

Se clasifican como cohesivos y no cohesivos. Los cohesivos son ríos alojados en un material predominantemente arcilloso. Los no cohesivos, también llamados granulares, son ríos alojados en un material que no desarrolla cohesión, es decir, uno formado por partículas sueltas, pudiendo estar bien gradados con una granulometría extendida ($\sigma > 3$) o mal gradados con una granulometría uniforme ($\sigma < 3$).

2.1.1.6.- Según el tiempo que transportan agua

Se pueden dividir básicamente en tres grupos:

- Ríos perennes: estas corrientes transportan agua durante todo el año debido a que se encuentran localizados en regiones de lluvias abundantes, sin embargo, incluso en las áreas donde llueve poco existen ríos con estas características, pero son alimentados por aguas subterráneas. Son propios de climas húmedos.

- Ríos intermitentes: transportan agua en las épocas de lluvias cuando el nivel freático asciende. En épocas de sequías el río no transporta agua excepto cuando ocurre una tormenta, en donde surgen rápidamente y a gran velocidad. Son propios de climas semiáridos.
- Ríos efímeros: aquellos que sólo llevan agua bajo episodios de fuertes precipitaciones, manteniéndose secos el resto del tiempo. El nivel freático se encuentra siempre debajo del lecho, y es el río el que alimenta a los almacenamientos subterráneos. Son propios de climas áridos.

2.1.1.7.- Según la pendiente

La pendiente de un río puede considerarse la característica más importante para definir el régimen hidráulico. Dicho esto, se encuentran dos tipos:

- Torrenciales: suelen presentarse en zonas de piedemonte con pendientes longitudinales ($S > 1.5 \%$)
- Torrentes: son cursos de agua en zonas de montaña con pendiente longitudinal ($S > 6 \%$). El transporte de sólidos está compuesto principalmente por rocas, cantos rodados, grava y arena, por lo tanto se dice que el comportamiento del flujo es no newtoniano.

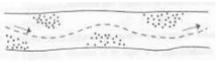
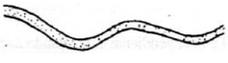
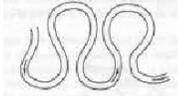
2.1.1.8.- Según la geometría

Para esta clasificación se emplea la relación conocida como índice de sinuosidad P .

$$P = \frac{\text{Longitud del thalweg}}{\text{Longitud del valle}}$$

A continuación se presenta una tabla a manera de relacionar el índice de sinuosidad con las distintas formas que adopta un río.

Tabla II-2: Relación de forma con el índice de sinuosidad P

Cauce	Descripción	Relación	Característica	Representación Gráfica
Recto	Ocurre en pequeños tramos y suelen ser transitorios, ya que cualquier perturbación ocasiona movimientos laterales que inicia el proceso de formación de curvas	$P > 1.2$	Normalmente los tramos rectos se presentan cuando el río discurre a lo largo de una falla geológica o cuando existe alguna modificación de tipo antrópica	
Sinuoso	Presenta movimientos laterales no significativos donde el río tiende a alcanzar el equilibrio de su pendiente de forma gradual	$1.2 < P < 1.5$	Suelen ser parte de todas las configuraciones de los ríos, se le denomina también moderada sinuosidad	
Meandros	Estos cauces presentan curvas alternadas unidas por tramos rectos y cortos.	$P > 1.5$	La pendiente normalmente es baja. Los tirantes en los tramos rectos son menos profundos que en las márgenes cóncavas	
Trenzados	No presentan un solo cauce sino que se dividen continuamente en varios cauces se entrelazan y se vuelven a separar. Los cauces son amplios y las márgenes no están bien definidas. Para caudales bajos existen dos o más cauces principales entrelazados y se forman cauces secundarios. En crecidas el agua cubre todos los cauces y grandes cantidades de sedimentos son depositados rellenando cauce antiguos		Generalmente poseen pendientes altas, el material es grueso y llegan grandes cantidades de sedimentos. La principal característica de estos cauces es que están sujetos a un proceso de sedimentación	

Fuente: “TEG Diseño de un canal de navegación fluvial, aplicando modelos matemáticos hidrodinámicos”. (Mendoza Christopher, 2013)

2.1.1.9.- Según las condiciones de transporte

En términos generales se considera que los tramos de los ríos están sujetos a un proceso de erosión o sedimentación o están en equilibrio. Una clasificación importante de los ríos relacionada con estos aspectos, es la propuesta de Schumm de 1963, que está basada en la carga de sedimento, pues considera que dicho factor afecta significativamente la estabilidad del cauce, su forma y su sinuosidad. Esta propuesta establece tres tipos principales de

cauces: estable, erosionable y depositante, y propone subclases dependiendo del modo de transporte del sedimento, ya sea en la capa de fondo, mixto o en suspensión.

Tabla II-3: Clasificación según Schumm (1963)

Forma del Transporte de Sedimento	M %	Estabilidad del Cauce		
		Estable	Deposición	Erosión
En suspensión del 85 al 100 %	100	F < 7 P > 2.1 S baja	El principal depósito ocurre en las márgenes que origina el estrechamiento del cauce. El depósito en el fondo es menor.	Predomina la erosión del fondo. Poca ampliación de márgenes.
En suspensión del 65 al 85 % y en el fondo del 15 al 35 %	30	7 < F < 25 1.5 < P < 2.1 S moderada	Es importante el depósito en las márgenes y también en el fondo.	Es importante la erosión del fondo y la ampliación de márgenes.
De fondo del 35 al 70 %	< 5	F > 25 1 < P < 1.5 S alta	Depósito en el fondo y formación de islas.	La erosión del fondo es baja, y la ampliación del cauce es muy importante.

Fuente: “Cátedra de obras hidráulicas: Obras Fluviales” (n.d, p.19)

Dónde: M: porcentaje de sedimentos transportados menores a 0,0074 mm (#200)

$$F = B / h$$

B: ancho de la superficie libre

h: tirante de agua

P: índice de sinuosidad

S: pendiente longitudinal del fondo

2.1.2.- Morfología fluvial: formas en planta

La morfología fluvial es el estudio de las formas que tienen los ríos. Cuando se habla de la forma de éstos, es decir de su apariencia, debe entenderse que esto equivale a describirlos tal como se ven desde el aire. Sin embargo, no debe perderse de vista que la apariencia de los ríos no es la misma a lo largo del tiempo. Los caudales que se presentan, básicamente en el estiaje o en la época de crecidas, son fundamentales para definir su forma. A lo anterior debe añadirse que cuando se habla de la forma de un río se trata de la forma de un tramo fluvial específico, pues los ríos no son iguales a lo largo de todo su recorrido.

Una vista aérea de los ríos indicaría que sus formas son tantas como ríos existen, pero para fines prácticos la morfología fluvial considera dos formas de planta típicas, que ya se mencionaron anteriormente. En primer lugar encontramos el cauce trenzado o con anastomosis, el cual es un cauce muy ancho con una multiplicidad de cauces menores (también llamados brazos) entrelazados o trenzados, dejando entre sí al unirse y separarse islas (sumergibles). Se pueden considerar como cauces inestables, ya que durante eventos extremos, una crecida por ejemplo, suelen cambiar considerablemente. De este modo se llaman “divagantes” porque un brazo principal puede encontrarse tan pronto en lugar como en otro. Su presencia se asocia a una gran capacidad de transporte sólido.



Figura. II-2: Planta y sección transversal de un cauce trenzado.

Fuente: “Ingeniería de ríos” (Martín, 2002, p.27)



Figura. II-3: Río entrelazado.

Fuente: “Morfología Fluvial” (Rocha, 2009, p.5)

La segunda morfología típica es la de cauce sinuoso o con meandros. El cauce es único pero se generan ondulaciones. Éstas se acompañan de una asimetría en las secciones transversales, ya que el tirante de agua es mayor junto a la orilla exterior y menor en la

orilla interior. El lugar geométrico de los puntos de mayor profundidad se llama thalweg (*del alemán, "camino por el valle"*). En las orillas interiores se va depositando material que emerge en forma de playas, llamadas barras alternadas, en otras palabras hay tendencia a la sedimentación, mientras que en las orillas exteriores hay tendencia a la erosión.

Los meandros son una morfología dinámica en el sentido de que presentan una evolución gradual. Aunque la evolución es compleja, se puede decir que es la combinación de dos movimientos, el primero una progresión o desplazamiento en dirección aguas abajo y el segundo una profundización a costa de las orillas, en dirección perpendicular a la anterior.

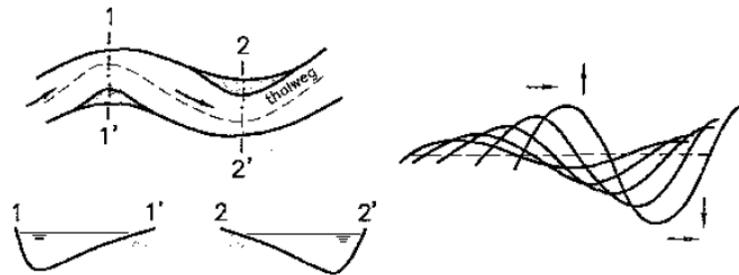


Figura. II-4: Cauce meandriforme: morfología (planta y secciones transversales vistas en el sentido de la corriente) y evolución ideal de la línea media (derecha).

Fuente: "Ingeniería de ríos" (Martín, 2002, p.28)

El ritmo de la evolución de los meandros depende de la resistencia de las orillas o márgenes del cauce a la erosión. En el caso de ríos que discurren por llanos aluviales poco resistentes, donde no existe restricción a la libertad de esta evolución, los meandros se mueven grandes distancias. Los meandros pueden ser tanto regulares como irregulares, también pueden ser simples si sólo presentan una frecuencia o longitud de onda dominante, o compuestos si existe más de una frecuencia dominante. La evolución de un meandro continuará hasta su punto final el cual es el estrangulamiento, esto en busca de formar un atajo y el abandono de los lóbulos. Por tanto, las circunstancias que pueden determinar la forma y apariencia de los ríos se le atribuyen a variabilidad temporal de las descargas, características del transporte de sedimento y presencia de vegetación.



Figura. II-5: Un río típico meándrico.

Fuente: “Morfología Fluvial” (Rocha, 2009, p.7)



Figura. II-6: Meandros regulares, irregulares, simples y compuestos.

Fuente: “Ingeniería de ríos” (Martín, 2002, p.28)

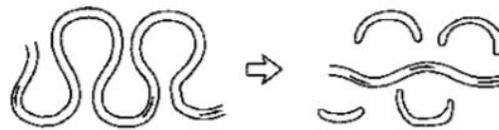


Figura. II-7: Estrangulamiento o corte natural de un meandro y formación de lagos.

Fuente: “Ingeniería de ríos” (Martín, 2002, p.28)

También se pueden presentar ríos con ambos tipos de morfología, es decir son trezados y meandriformes al mismo tiempo, tal como se presenta en siguiente figura. El carácter trezado y el meándrico pueden verse como dos ingredientes presentes en distintas porciones en un río real. Es muy frecuente que el río sea trezado en su tramo alto y luego aguas abajo sea meandriforme.



Figura. II-8: Representación de un río trenzado y meandriforme.

Fuente: "Ingeniería de ríos" (Martín, 2002, p.29)

2.1.3.- Vías fluviales

Una vía fluvial no es más que un camino por donde transitan embarcaciones cuyo principal medio son los ríos o los canales. El transporte fluvial tiene numerosos atributos y potencialidades en comparación con otros tipos de transporte en términos de logística, economía, seguridad y protección al medio ambiente, manteniendo su puesto entre los medios contemporáneos de transporte más ventajosos.

En la siguiente figura, a medida de ejemplo, puede apreciarse que este medio de transporte supera ampliamente al transporte ferroviario y carretero, lo cual no significa que deba prescindirse de éstos pues para llegar a los puertos fluviales es necesario utilizar ambos medios, en virtud de que los centros de producción de mercancías (los generadores de cargas) se encuentran a muchos kilómetros de los mismos en todas las cuencas hidrográficas del continente. Es claro que el transporte fluvial no descarta sino que promueve la intermodalidad.

Actualmente se observa a los ríos y vías fluviales bajo un enfoque integral, que tiene en cuenta la producción, el transporte, la comercialización, el medio ambiente, la cultura y la ciudadanía, entre otros aspectos relevantes.

Para transportar 1.600 t^A
se requiere:

Vía fluvial:	1 barcaza
Vía ferroviaria:	40 vagones de 40 t
Vía carretera:	80 camiones de 20 t

Con relación al consumo de energía,
con un litro de gas oil se transporta una ton:

Por barcaza	251 km.
Por ferrocarril:	101 km.
Por camión:	29 km.

Con relación al flete y
tomando como índice la unidad:

Hidroviario:	1.00
Ferroviano:	1.40
Carretero:	3.20

En relación con la potencia,
con un HP^B se puede transportar:

Hidroviario:	22.2 t
Ferroviano:	7.4 t
Carretero:	1 t

A. Tonelada
B. Horsepower o caballo de fuerza

Figura. II-9: Ventajas del transporte fluvial.

Fuente: “Hidrovías para el desarrollo y la integración suramericana” (CAF, 2016, p.16)

Además de las ventajas expuestas en esta figura, en donde se enfocan en la eficiencia del transporte en cuanto a la carga, el flete, el consumo de energía y la potencia, el transporte fluvial presenta otras ventajas como:

- Es el menos contaminante, al tener uno de los niveles de emisión de CO₂ más bajos de todos los medios de transporte. Se considera que transportar mercancías por ríos es una forma de transporte respetuosa con el medio ambiente.
- Al tomar el único medio de transporte que no está atiborrado, lo primero que se garantiza es una alta confiabilidad en los tiempos de entrega.
- Tiene bajos niveles de accidentabilidad y de impacto ambiental por la emanación de ruidos, principalmente al compararlo con el transporte terrestre.
- Hace factible económicamente la realización de las obras para el aprovechamiento y la utilización integral de los ríos, así, al combinar las obras para los aprovechamientos hidroeléctricos con las obras para la navegación, se obtiene una más rápida recuperación de las inversiones; estas mismas obras ayudan a controlar las inundaciones y, a la vez, favorecen el riego, los abastecimientos de agua, el turismo y los desarrollos recreacionales.

- Propicia de manera apreciable las actividades económicas de todo tipo, por lo tanto las regiones se ven beneficiadas ampliamente por una navegación fluvial utilitaria en sus ríos.

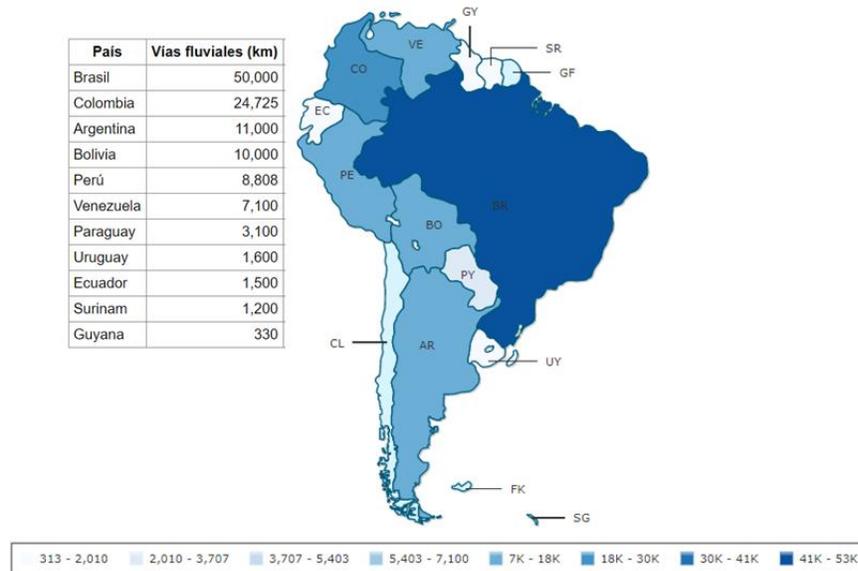


Figura. II-10: Cantidad de vías fluviales de Suramérica según el país (km).

Fuente: “<https://indexmundi.com>” Tomado el 02 de septiembre 2020

2.2.- Eje fluvial Orinoco-Casiquiare-Negro-Amazonas

Para comenzar este punto, se debe mencionar la obra más importante que se ha realizado en el país para favorecer la navegación fluvial, la cual tuvo lugar a mediados del siglo XX, que fue el desarrollo del canal de navegación del río Orinoco, con una longitud de 361 km entre Boca Grande y Matanzas. El curso total de río Orinoco es de 2.140 km, de los cuales 1.180 km corresponden a la distancia entre la desembocadura y la población de Puerto Ayacucho. En 1952 se crea el Instituto Nacional de Canalizaciones (INC), con el objeto de mantener tanto este canal como el canal de navegación de Maracaibo, así como desarrollar otras vías de ese tipo en el país.

El propósito principal del canal de navegación del Orinoco ha sido el de facilitar la exportación de mineral de hierro, aunque también ha servido para el intercambio comercial

de otras empresas industriales de Guayana y, en menor grado, para el abastecimiento de la región con mercancías de carga general. En Ciudad Guayana se construyeron varios puertos industriales para llevar a cabo ese intercambio, destacando los puertos de las empresas Ferrominera, Sidor, Venalum, Alcasa, Interálumina y Cementos Guayana.

Otro hito importante para la navegación fluvial en el país lo constituyó el inicio del transporte de bauxita desde el puerto de El Jobal, cerca de los yacimientos de Los Pijiguaos, hasta Matanzas en Ciudad Guayana, aprovechando un canal natural con una longitud de 634 km según el INC, que no requiere de dragado de mantenimiento anual, aunque presenta grandes diferencias de profundidades, tanto en el espacio como en el tiempo. De esta manera, se ha aprovechado el río Orinoco para la navegación en casi todo su recorrido, desde su desembocadura hasta la población de Puerto Ayacucho, con cambios significativos en la geometría del cauce y por lo tanto de las embarcaciones que transitan en él. Aguas arriba de Puerto Ayacucho el río presenta los raudales de Atures y Maipures, los cuales son un obstáculo natural muy severo para la navegación, ya que la interrumpen.

Tabla II-4: Navegación del río Orinoco.

Tramo del río	Longitud (km)	Descripción
Boca Grande - Matanzas	361	Es navegable durante todo el año para buques de 65000 T de desplazamiento con calados de 9,7 a 13,4 m. La navegación es diurna y nocturna. Mantenimiento a través de dragado, hidrografía y balizamiento. La institución responsable es el INC.
Matanzas - El Jobal	634	Canal natural navegable durante 8 meses (mayo-diciembre) para trenes de gabarra de 38000 T de desplazamiento con calados de 1,2 a 3,3 m. La navegación es diurna. Mantenimiento solo a través de hidrografía y balizamiento. La institución responsable es el INC.
El Jobal - Pto. Ayacucho	185	Canal natural con 1 a 2,5 m de calado, en donde solo permite un régimen de navegación diurna, ya que para la presente fecha, no se dispone de un sistema de señalización y balizaje. En los actuales momentos ninguna institución es responsable de la operación del canal.

Elaboración propia con información tomada del Instituto Nacional de Canalizaciones.



Figura. II-11: Tramos de río Orinoco.

Elaboración propia

Siguiendo por el eje, el río Orinoco se conecta con la cuenca del Amazonas, transfiriendo parte de sus aguas a través del Casiquiare hacia el río Negro, afluente del río Amazonas. Desde la cabecera del río Negro hasta el pie de Cachoeiras São Gabriel, la profundidad navegable supera los 7 pies (2,1 m) inclusive en años extremadamente secos (USACE). El recorrido total por el Negro es de 950 km. Desde Manaos hasta Belén, en el Atlántico, el recorrido es de 1.488 km, apto para embarcaciones superiores a nueve metros de calado.

2.2.1.- Raudales

Los raudales o rápidos son básicamente corrientes de agua que se aceleran ante un cambio en la pendiente del cauce y cuyo flujo es en gran medida interferido por bloques de piedra que crean turbulencia. Al igual que estos raudales, los saltos, las cataratas, las cascadas y los torrentes son manifestaciones de caídas de agua que están atados a factores

como el origen, el volumen de agua, la altura y los rasgos geométricos, los cuales determinan su clasificación.

Tanto el Orinoco como todos los otros ríos del estado Amazonas, tienen sus cursos de agua más o menos interrumpidos por estos mencionados saltos o raudales, los cuales pueden ser de mayor o de menor importancia, según se tome en cuenta su altura, su fuerza y volumen o su curso accidentado para impedir la navegación.

El Orinoco cerca de las cabeceras tiene, remontándolo, los saltos Guaharibos, Peñascal, Salas, Codazzi, Michelena y Rojas, Cajigal, Arístides Rojas, Shama, Bobadilla, Sombrero, Dickey, el Salto Libertador y otros menores; en su parte media los rápidos de El Muerto y Santa Bárbara, que contienen numerosas rocas e islas que rompen el curso del río y producen un canal de navegación angosto y curvo, y los principales, los raudales de Atures y Maipures, que interrumpen la navegación, aguas arriba de Puerto Ayacucho, como ya se mencionó anteriormente. Estos últimos raudales son el producto de pequeños desplazamientos e irregularidades de la corteza en donde se generan crestas y pliegues (USACE, 1943).

El conjunto de raudales agrupados con el nombre de Atures, se encuentran diseminados en una zona de unos 8 km, con una diferencia de desnivel de unos 10 metros. Continuando la remontada del río viene después una parte relativamente tranquila de unos 30 km. Más al Sur está el otro grupo de raudales que se encuentran en la zona de Maipures, están repartidos en unos 6 km de cauce con una diferencia de nivel de unos 12 metros. Atures y Maipures al interrumpir la navegación, constituyen el límite natural entre el Bajo Orinoco y Alto Orinoco.

Algunas caídas de agua que presenta el Casiquiare son Cabarúa, Mabajate, Kiragüeni y Chapazón; en el Atabapo están Guarinuma y Chamuchina; y en el Guainía: Venado, Paso del Diablo, Corocoro, Lombriz. Estas caídas de agua y sobre todo las del Amazonas no han sido aprovechadas en ninguna forma hasta ahora. Configuran un gran potencial hidroeléctrico que se pierde, capaces posiblemente de generar energía eléctrica para abastecer parte del país.

El río Negro por su parte, es profundo y ancho sin ningún riesgo para la navegación, excepto donde aparecen los raudales (18 raudales) situados alrededor del poblado de São

Gabriel do Cachoeira, extendiéndose casi 55 km y con diferencia de nivel de 15 m. Este río luego sigue un curso aluvial, sin interrupciones aparentes, con profundidades de 15 pies (4,6 m) o más en todo momento, hasta el Puerto de Manaos, el cual es el centro mercantil y de distribución para la cuenca del Amazonas (USACE, 1943).

Ninguno de estos rápidos, con la excepción de Atures, Maipures, Santa Bárbara y São Gabriel, presentaría una obstrucción significativa en la navegación para un barco fluvial con la potencia adecuada, bien operado y fiable (USACE, 1943).



Figura. II-12: Vista satelital de los raudales de Atures (izquierda) y Maipures (derecha).

Fuente: “<https://earthexplorer.usgs.gov/>” Tomado el 15 septiembre 2020.

2.2.2.- Río Casiquiare

Este río es un canal natural ubicado en el estado Amazonas de Venezuela que, como se mencionó anteriormente, conecta dos de los ríos más grandes del mundo, el Orinoco y el río Amazonas y por consecuencia también sus cuencas. Según varios autores este es el mayor ejemplo de captura de ríos en el mundo, retirando entre el 20% y el 30% de las aguas del Orinoco. El Alto Orinoco se bifurca río abajo del pueblo de Tamatama, dando así origen al río Casiquiare, el cual recorre unos 356 km antes de encontrarse con el río Guainía, que a partir de este momento se convierte en el río Negro, justo aguas arriba de la localidad de San Carlos.

En el Casiquiare, en un año normal, se puede obtener una profundidad de 6 pies (1,8 metros) o más durante más de 10 meses, y 4 pies (1,2 metros) o más durante 12 meses (USACE, 1943).



Figura. II-13: Mapa de ubicación del río Casiquiare.

Fuente: “<https://riosdelplaneta.com/rio-casiquiare/>” Tomado el 15 septiembre 2020.

El Casiquiare tiene varios afluentes a lo largo de su recorrido, pero los principales y más importantes se concentran a lo largo de su margen izquierda y son los ríos Pamoni, Pasiba, Siapa y Pasimoni, los cuales provienen de las Sierras Curupira, Tapirapeco, Imeri y Neblina, ubicadas en el sur de Venezuela, con elevaciones máximas entre 2000 y 3000 msnm.



Figura. II-14: Principales afluentes del río Casiquiare.

Fuente: “Water and Sediment Budget of Casiquiare Channel Linking Orinoco and Amazon Catchments, Venezuela” (Laraque et al., 2019, p.2)

Las coordenadas de la bifurcación en su origen (Alto Orinoco en Venezuela) son N. 03°08'25,26" y W. 65°52 '48,66", y las coordenadas de su boca (también en Venezuela) son N. 02°00'15,18" y W. 67°06'52,44".

Entre sus dos extremidades, la diferencia de elevación es de aproximadamente 21 m, con una pendiente promedio de $6 \text{ cm}\cdot\text{km}^{-1}$. Pero este gradiente hidráulico puede variar de 7,82 a $8,55 \text{ cm}\cdot\text{km}^{-1}$ entre agua baja y alta. La llanura circundante tiene una pendiente de $10,3 \text{ cm}\cdot\text{km}^{-1}$ (Laraque et al.).

2.2.2.1.- Origen y evolución del río

En tiempos remotos, el Casiquiare no existía. Para poder entender mejor el proceso de evolución del río se presenta la siguiente figura, la cual fue tomada del artículo presentado por Laraque et al.

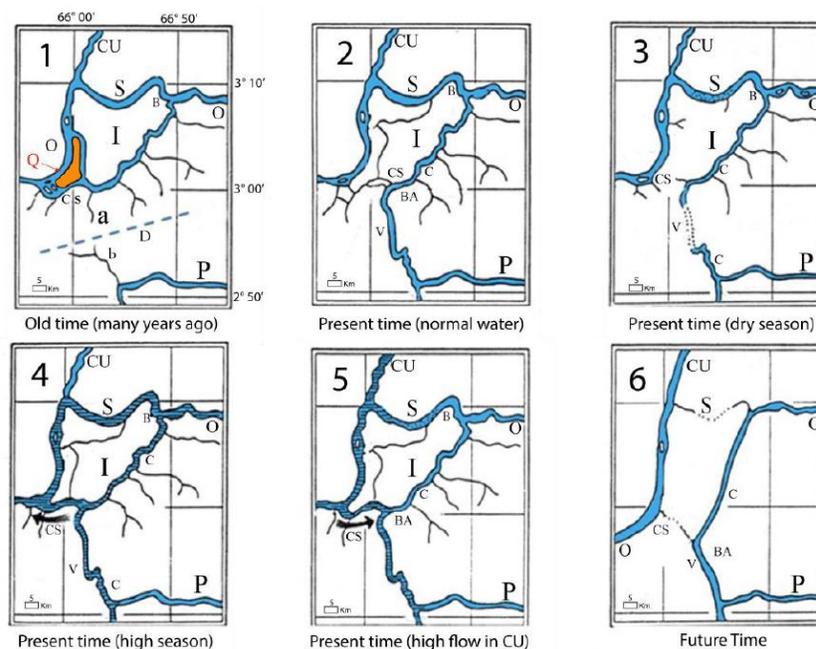


Figura. II-15: Tendencias pasadas y futuras en la evolución del río.

Fuente: "Water and Sediment Budget of Casiquiare Channel Linking Orinoco and Amazon Catchments, Venezuela" (Laraque et al., 2019, p.5)

En donde O= Orinoco; C= Casiquiare; CU= río Cunucunuma; B= bifurcación; I= isla fluvial; CS= Caño Seco; BA= sector de Buenos Aires; V= Venados (pueblo abandonado); P= río Pamoni; S= canal norte de la isla; Q= Isla Quiritari (en naranja); D= división del agua; a= canal pequeño; b= canal pequeño.

Explicando los números del 1 al 6 de la figura anterior:

[1] El río Orinoco se dividió en dos canales pasando alrededor de una isla fluvial (I). El Casiquiare superior solía ser una de las ramas del río Orinoco (rama sur). La confluencia del río Cunucunuma (CU) con el Orinoco (O) se localizó en la rama norte (S) de la isla. El tramo inferior de la rama sur era Caño Seco (CS), que solía fluir alrededor de la isla Quiritari (Q) antes de ingresar al canal principal del río Orinoco. A cierta distancia hacia el sur, el río Pamoni, un río perenne, era la cabecera del río hoy llamado Casiquiare, que desembocaba en el río Negro y la cuenca del Amazonas. La división de drenaje aproximada entre las cuencas del Orinoco y el Amazonas solía ser la línea discontinua indicada por D.

[2] Probablemente, durante los flujos altos, la rama sur del río Orinoco comenzó a fluir hacia el río Pamoni a través del canal (a) y el canal (b). El material aluvial que compone la división de drenaje (D) se erosionó y se formó un nuevo canal, que fue la génesis del río Casiquiare por procesos de avulsión. Este proceso que se caracteriza por el abandono de un cauce fluvial para la formación de uno nuevo como consecuencia de diferencia de pendientes, siendo mayor la del nuevo cauce, también se le suele llamar “re-direccionamiento deltaico”. Dicho esto, la captura de las aguas del Orinoco fue ayudada por la existencia de una pendiente del terreno más grande hacia el sur que hacia el oeste. Caño Seco fue abandonado y se convirtió en un canal seco, que fluye solo durante la temporada de alto flujo.

[3] Cerca de un pueblo abandonado, llamado Venados (V), el Casiquiare está casi seco durante la temporada baja, lo que dificulta la navegación. Esta observación se realizó durante la expedición de Oriampla al Orinoco en enero de 1980.

[4, 5] En la actualidad, durante una combinación de caudales altos en el río Cunucunuma y caudales bajos en el Orinoco, el flujo en Caño Seco (CS) podría revertirse.

[6] Algunos investigadores sugieren que en un futuro el Casiquiare se convertirá en el canal dominante capturando totalmente los flujos del Orinoco y que las cabeceras del Orinoco serán las cabeceras del río Cunucunuma. Esto debido a una combinación de sedimentación en el canal del Orinoco y la inundación estacional de la división de drenaje que favorece al Casiquiare.

La ubicación de la captura inicial del Orinoco se encuentra al nivel de la rama sur y aguas abajo de la isla del río (I), y no en la bifurcación del Casiquiare, que se encuentra aguas arriba de la misma isla del río y aguas abajo de Tamatama, como se menciona con demasiada frecuencia en la literatura (Laraque et al.).

2.2.2.2.- Mediciones de descarga obtenidas en 1943

El Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos (USACE) en el año 1943 realizó un estudio en donde se realizaron unas mediciones de descarga y velocidades en ciertos puntos del eje fluvial. Se tomaron en consideración las realizadas en el río Casiquiare.

Tabla II-5: Mediciones de descarga y velocidad realizadas en marzo de 1943 por el USACE.

Río	Caudal	Velocidad promedio
Casiquiare (debajo de la bifurcación)	8350 cfs = 236,4 m ³ /s	2,01 ft/s = 0,61 m/s
Pamoni (boca)	5790 cfs = 163,9 m ³ /s	2,76 ft/s = 0,84 m/s
Siapa (boca)	43500 cfs = 1231,8 m ³ /s	2,60 ft/s = 0,79 m/s
Pasimoni (boca)	20100 cfs = 569,2 m ³ /s	1,53 ft/s = 0,47 m/s
Casiquiare (cerca de San Carlos)	86500 cfs = 2449,4 m ³ /s	2,83 ft/s = 0,86 m/s
Guanía (cerca de San Carlos)	32600 cfs = 923,1 m ³ /s	1,26 ft/s = 0,38 m/s
Negro (San Carlos)	130000 cfs = 3681,2 m ³ /s	4,06 ft/s = 1,24 m/s

Nota: cfs (cubic foot per second – pies cúbicos por segundo)

Elaboración propia con información tomada del USACE

2.2.2.3.- Mediciones obtenidas en la expedición del año 2000

En septiembre del año 2000 se llevó a cabo una expedición, realizada por Paul Georgescu y Alain Laraque entre otros, en donde se realizaron mediciones batimétricas, de descarga y de perfil físico-químico a lo largo de seis secciones, los cuales se denotan por T1 a T6 en la figura siguiente. Las mediciones fisicoquímicas se realizaron en tres puntos en la vertical (superficie, medio e inferior) en el centro del río.

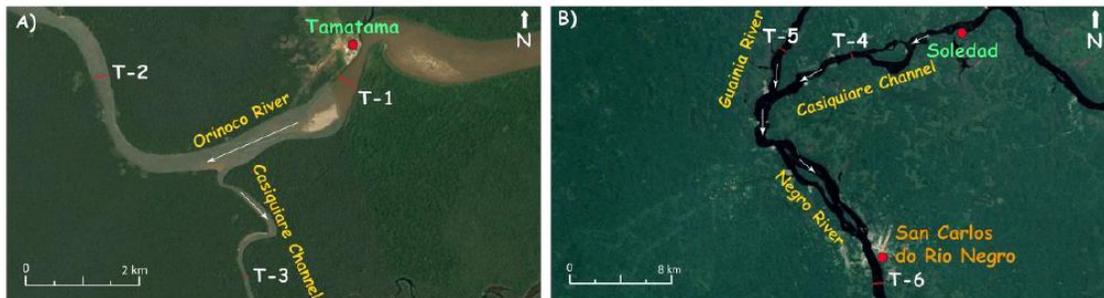


Figura. II-16: Vista satelital del río Casiquiare en la bifurcación (izquierda) y confluencia (derecha).

Fuente: “Water and Sediment Budget of Casiquiare Channel Linking Orinoco and Amazon Catchments, Venezuela” (Laraque et al., 2019, p.4)

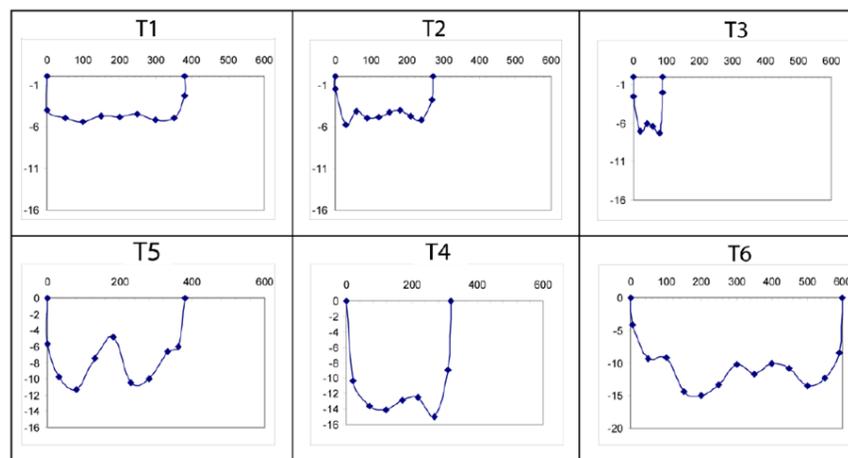


Figura. II-17: Perfiles batimétricos obtenidos en las seis secciones del río por medio de una ecosonda (Eagle Strata 128), profundidades y anchos en metros.

Fuente: Modificado de “Water and Sediment Budget of Casiquiare Channel Linking Orinoco and Amazon Catchments, Venezuela” (Laraque et al., 2019, p.7)

En donde T1: Orinoco aguas arriba de la bifurcación; T2: Orinoco aguas abajo de la bifurcación; T3: Casiquiare en la entrada; T4: Casiquiare en la salida; T5: río Guainía antes de la confluencia; T6: Río Negro en San Carlos.

Tabla II-6: Datos hidrológicos y fisicoquímicos obtenidos en el año 2000.

Transect number	Date	Station	River	Q	V	W max	Depth of sampling	H max	Temp	EC	Turb	pH	TSS	TSS Fluxes
				m ³ s ⁻¹	m s ⁻¹	m	m	m	°C	μS·cm ⁻¹	NTU		mg·L ⁻¹	kg·s ⁻¹
T1	9-09-00	Puerto Ayacucho	Orinoco		1.94		0		27.3	7.0	26.0	5.00	49.20	
	10-09-00	Tamatama	Orinoco	2323	1.28	380	0	5.20	26.0	14.0	22.0	5.74	34.40	79.69
	"	"	"				-2		"	14.0	25.0	5.78	34.20	
	"	"	"				-4		"	13.0	30.0	5.84		
T2	10-09-00	Downstream bifurcation	Orinoco	1343	1.11	270	0	5.80	26.5	15.0	24.0	5.70	32.00	42.99
T3	10-09-00	Bifurcation	Casiquiare	720	1.39	88	0	7.30	26.0	14.0	18.0	5.87	43.60	31.66
	"	"	"				-3				30.0		44.40	
	"	"	"				-6				34.0			
T4	11-09-00	Mouth	Casiquiare	5438	1.39	320	0	14.10	26.7	7.0	7.9	4.20	8.00	48.94
	"	"	"				-6				7.0		10.00	
	"	"	"				-12				7.9		9.00	
T5	11-09-00	Confluence	Guainia	2573	0.83	380	0	11.30	26.8	14.0	0.4	3.73	0.20	0.51
T6	11-09-00	San Carlos	Negro	8034	1.19	600	0	14.30	26.9	9.0	1.5	3.90	5.60	44.99
T7	12-09-00	San Gabriel	Negro	6878			0		28.0	10.0	0.9	3.48	3.40	

Fuente: "Water and Sediment Budget of Casiquiare Channel Linking Orinoco and Amazon Catchments, Venezuela" (Laraque et al., 2019, p.8)

En donde Q= descarga de flujo; V= velocidad de flujo superficial; Wmax= ancho máximo del canal; Hmax= profundidad máxima; Temp= temperatura; EC= conductividad eléctrica; Turb= turbidez; TSS= concentración total de sedimento suspendido.

A lo largo de su recorrido, como se puede apreciar en las figuras anteriores, el río sufre variaciones significativas entre la entrada y la salida, las más visibles son el aumento en su ancho (3 a 4 veces), en el flujo (7 a 8 veces), y su cambio en el color del agua (agua blanca a agua negra), bajo la influencia de afluentes procedentes de vastas llanuras forestales.

También se puede apreciar que en la bifurcación el balance hídrico es casi 90% completo y el balance de flujo de sedimentos 94%, mientras que en la confluencia el balance hídrico es casi 100% completo y el balance de flujo de sedimentos 91%. Es posible que estas diferencias en cuanto a los balances se deban al protocolo de medición de flujo. Dicho esto, es razonable suponer que la ley de conservación de la masa se respeta, tanto en la bifurcación como en la confluencia.

2.2.2.4.- Cuenca del río

Dependiendo de la estación del año (lluvia o estiaje), del 20% al 30% de las aguas del río Orinoco aguas arriba de la bifurcación fluye hacia el río Casiquiare. Por lo tanto si se separa la cuenca del Orinoco en sub-cuencas (Alto y Bajo Orinoco), se podría decir que la cuenca del Alto Orinoco alimenta dos cuencas.

La cuenca del Casiquiare se encuentra limitada exclusivamente en la parte norte por su propio curso del río, ya que los afluentes de esta parte (margen derecha) son pocas y pequeñas corrientes cuyas áreas drenadas son insignificantes en comparación con la de toda la cuenca.

No se puede calcular el caudal específico de la cuenca del Casiquiare, porque su captación está compuesta de dos partes. La primera fluye directamente al Casiquiare y la segunda fluye al mismo tiempo al Orinoco y al Casiquiare. Eso significa que la cuenca del Casiquiare está delimitada tanto por una línea de cuenca típica (que rodea un área de 42,810 km²) como por un área de cuenca inusual de 40,110 km² (que corresponde a la cuenca del Orinoco superior) compartida por las cuencas del Orinoco y el Amazonas (Laraque et al.).

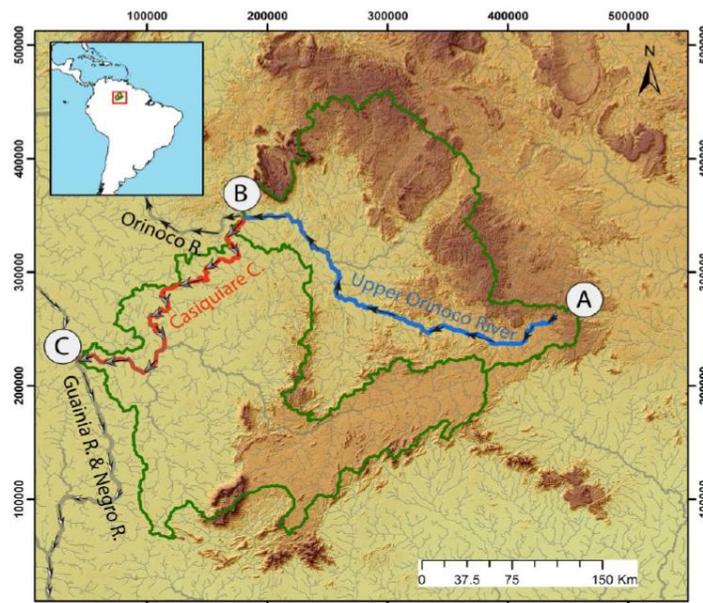


Figura. II-18: Cuencas del río Casiquiare y Alto Orinoco.

Fuente: “Water and Sediment Budget of Casiquiare Channel Linking Orinoco and Amazon Catchments, Venezuela” (Laraque et al., 2019, p.13)

En la cuenca del Alto Orinoco se encuentra un relieve montañoso, cubierto de vegetación densa, que contiene principalmente corrientes de “agua clara” con pH ligeramente ácido y un contenido moderado de sedimentos, por lo que el Casiquiare comienza su curso con similares condiciones de agua. Durante su trayecto, a lo largo de su margen izquierda recibe los flujos de muchas corrientes de “aguas oscuras”, como los ríos Pamoni, Pasiba, Siapa y Pasimoni (áreas selváticas de elevaciones más bajas cubiertas con bosques tropicales), que transportan agua de pantanos las cuales tienen un pH más ácido debido al alto contenido de ácidos húmicos orgánicos disueltos y un menor contenido de sedimentos. Por lo tanto, el Casiquiare sufre una transición gradual en el color hasta su descarga en el río Negro.

2.2.3.- Propuestas de desarrollo del eje fluvial por parte del USACE (1943)

El problema estudiado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos (USACE) en el año 1943 se basó en buscar la forma más adecuada y el costo probable de utilizar el sistema de vías fluviales formado por el río Orinoco, el Casiquiare y el río Negro, como arteria de intercambio de mercancías entre las zonas costeras del Mar Caribe y los territorios de la cuenca del Amazonas de Venezuela, Colombia, y Brasil.

La vía fluvial completa desde la desembocadura del Orinoco hasta el puerto de Manaus, centro de distribución de la cuenca del Amazonas, sería una alternativa económica en comparación a la ruta oceánica y fluvial que realizaban los buques de navegación marítima por la costa este y por el río Amazonas hasta Manaus. En ese momento (1943) el tráfico marítimo en esta última ruta estaba siendo severamente acosado por ataques submarinos, y una ventaja de la vía navegable interior era que reduciría la exposición a tales ataques (USACE, 1943).

Para la vía fluvial Orinoco-Casiquiare-Negro se propuso la utilización de barcazas impulsadas por remolques. La barcaza más económica es la más grande que se puede manejar sobre la vía fluvial con el calado requerido sin riesgo alguno, por lo tanto, las dimensiones y el número de estas barcazas y remolques se ven limitados en ciertos tramos o secciones de la vía.

El estudio consistió en un desarrollo de mejora progresiva de la vía fluvial para volúmenes crecientes de comercio y para esto el USACE propuso cuatro planes:

- Plan AA - Operación mínima.

Bajo este plan, no se propone ninguna mejora de los canales fluviales existentes y se utilizaría el equipo mínimo que se considere factible. La carga se transportaría por los raudales de Atures y Maipures a través de una carretera reconstruida que se extiende hasta un nuevo puerto denominado Puerto Maipures, y luego se trasladaría por los ríos existentes por una flota de 5 remolcadores Tipo 2 y 6 barcas Tipo A. Estos remolcadores y barcas se describen más adelante tanto para este Plan como para los posteriores.

- Plan A - Operación del río abierto.

Las instalaciones previstas consistirían principalmente en remolcadores y barcas (9 remolcadores Tipo 1, 2 remolcadores Tipo 2 y 24 barcas Tipo A), con pequeñas estructuras terminales portuarias, mejoramiento y extensión de la Carretera de Puerto Ayacucho a Puerto Maipures, y provisión de unidades de acarreo en la carretera.

- Plan B - El río abierto mejorado.

La carga se seguiría transportando como para los Planes AA y A, pero los canales fluviales existentes se mejorarían mediante la remoción de una serie de rocas y arrecifes y con una pequeña cantidad de dragado en la sección superior del Orinoco y Casiquiare para permitir el manejo de más barcas por cada remolcador. La flota estaría formada por 9 remolcadores Tipo 1, 3 remolcadores Tipo 2 y 45 barcas Tipo A.

- Plan C - Canalización de rápidos y mejora del canal.

Bajo este plan, se proporcionarían esclusas y presas en los raudales de Atures y Maipures para llevar remolques sobre esos rápidos y eliminar el transporte por la carretera. El actual sistema fluvial se mejoraría ampliamente para proporcionar un canal fácilmente navegable con una profundidad mínima de 10 pies en aguas bajas entre Puerto Ayacucho y el pie de Cachoeiras Sao Gabriel, dragando, removiendo rocas y ampliando curvas de radio pequeño y puntos peligrosos. El arrecife principal de Sao Gabriel sería eliminado o pasado por una esclusa y una presa. Un plan alternativo sería la provisión de una esclusa y una presa cerca del pie de las Cachoeiras, que también permitiría la generación de al menos 800.000

kilovatios de energía eléctrica durante el 90% o más del tiempo. La flota sería de 34 remolcadores Tipo 1, 6 remolcadores Tipo 2 y 210 barcazas Tipo A.

La descripción de la barcaza y remolcadores tipo se presentan a continuación:

Barcaza Tipo A: 36 ft de manga, 150 ft de eslora y 6 ft de calado, casco de acero, con una capacidad de carga nominal de 639 toneladas a 6 ft de calado, 331 toneladas a 4 ft de calado y 881 toneladas a una deriva máxima de 7,5 ft.

Remolcador Tipo 1: 26 ft de manga, 70 ft de eslora y 4 ft de calado, casco de acero propulsado por dos motores diesel de 700HP. La velocidad de operación normal con estos remolques, de 7,5 a 11 millas por hora, le da un amplio poder de reserva para usar en rápidos y canales torcidos.

Remolcador Tipo 2: 20,5 ft de manga, 63 ft de eslora y 3 ft de calado, casco de acero, propulsado por dos motores diesel de 250HP. Las velocidades normales de operación serían de 3,5 a 8 milla por hora.

2.3.- Imágenes satelitales

Una imagen satelital consiste en la representación visual de aquella información que es registrada por un satélite artificial. Estos satélites disponen de sensores que les permiten recoger información que refleja la superficie terrestre. Una vez que reciben los datos, los envían de nuevo a la Tierra, donde son procesados.

En 1972, Estados Unidos puso en órbita el primer satélite de una línea denominada Landsat, que fueron construidos con el propósito de obtener imágenes satelitales de nuestro planeta en alta resolución. La línea Landsat tiene hasta la fecha ocho satélites que ofrecen diferentes imágenes satelitales acotadas a momentos temporales y bajo resoluciones de pixel diferentes. Estos satélites son: Landsat 1 (1972-1978), Landsat 2 (1975-1982), Landsat 3 (1978-1983), Landsat 4 (1982-1993), Landsat 5 (1984-2013), Landsat 7 (1999-actualidad), Landsat 8 (2013-actualidad). En la actualidad se encuentran fuera de servicio las primaras cinco, por lo tanto Landsat 7 y Landsat 8 son las actualmente vigentes para la descarga diaria de imágenes. El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) da

acceso a información satelital Landsat, así como una colección completa de datos y productos de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA).

Aparte de los satélites Landsat, cuyos encargados son la NASA, el USGS y la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOOA), se encuentran también, entre otros, los satélites Sentinel-1 (2014) y Sentinel-2 (2015) pertenecientes al programa Copernicus de la Agencia Especial Europea (ESA).

Las imágenes de satélite han contribuido enormemente a mejorar nuestro conocimiento de distintos territorios, generando una herramienta de gran utilidad para distintas aplicaciones, ya que se emplean en múltiples campos. Contar con este tipo de fotografías de la Tierra es muy útil para la cartografía, por ejemplo. También se utilizan para estudiar el clima, pronosticar fenómenos atmosféricos, desarrollar sistemas de información geográfica, mostrar los cambios que se dan con el paso del tiempo (retroceso de la línea costera, desplazamientos de ríos, crecimiento de islas, pérdida de vegetación), etc.

Es esperable que este tipo de tecnología mejore significativamente en el futuro, logrando una visión incluso más nítida de la que hoy puede encontrarse.

2.4.- Modelo Digital de Elevación (DEM)

La representación del relieve siempre ha tenido importancia para conocer la información que existe acerca de los elementos en la superficie de la tierra, siendo de gran relevancia para el análisis y estudios de muy diversa índole en los campos de ingeniería civil y ciencias de la tierra. El estudio de la forma del terreno constituye un importante insumo para muchos usuarios como cartógrafos, geólogos, hidrólogos, ingenieros, militares y ahora en la actualidad para los sistemas de información geográfica.

El modelo digital de elevación desde su creación en la década de los 50 ha constituido un medio para el conocimiento y representación del terreno y para lograr el análisis de los elementos presentes en el mismo mediante el uso de un software especializado para tal fin.

Habiendo dicho esto, se puede decir que un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En la búsqueda de desarrollar el concepto de Áreas de Interés Navegable (AIN) dentro del ámbito de la navegación fluvial, resulta importante dar una visión clara de cómo se ejecutará este proyecto, por lo tanto, primero se establecerá el tipo de investigación y posteriormente se procederá a estructurar el método de trabajo en fases o etapas asociadas de manera directa a los objetivos planteados.

3.1.- Tipo de investigación

Según Hurtado (2000) una investigación exploratoria prepara el camino para otras investigaciones a futuro ya que el tema a investigar está escasamente definido o con falta de información al respecto.

Otros autores consideran la investigación exploratoria como la fase inicial de un proceso de investigación continua, en la cual, una vez que el investigador ha obtenido información suficiente, puede plantearse objetivos más complejos (Hernández Sampieri y otros 1991; Namakforoosh 1995; Selltiz y otros 1971).

Por otro lado una investigación descriptiva pretende lograr la descripción o caracterización del evento de estudio dentro de un contexto particular, indicando sus rasgos peculiares o diferenciadores. Este tipo de investigación se realiza cuando la experiencia y la exploración previa indican que no existen descripciones precisas del evento en estudio, o que las descripciones existentes son insuficientes o han quedado obsoletas debido a un flujo distinto de información, a la aparición de un nuevo contexto, a la invención de nuevos aparatos o tecnologías de medición, etc. (Hurtado 2000).

En base a lo expuesto anteriormente, se puede decir que el presente trabajo de grado corresponde a una combinación entre ambos tipos de investigación, ya que se busca de alguna manera ampliar la información y el interés existente sobre el río Casiquiare, recopilando y analizando los datos que se tienen de él, para generar así una nueva base o punto de partida para proyectos de mayor profundidad, como por ejemplo, un posible diseño del canal de navegación.

3.2.- Fases de la investigación

El proyecto de investigación está basado en una estructura de cinco (5) fases y en cada una de ellas se van a realizar una serie de actividades. A continuación se presentan dichas fases:

- **Fase 1:** Recopilación de información bibliográfica.
- **Fase 2:** Selección de las AIN estableciendo previamente los criterios.
- **Fase 3:** Aplicación de los criterios.
- **Fase 4:** Construcción de un Modelo Digital de Elevación (DEM).
- **Fase 5:** Requerimientos técnicos.

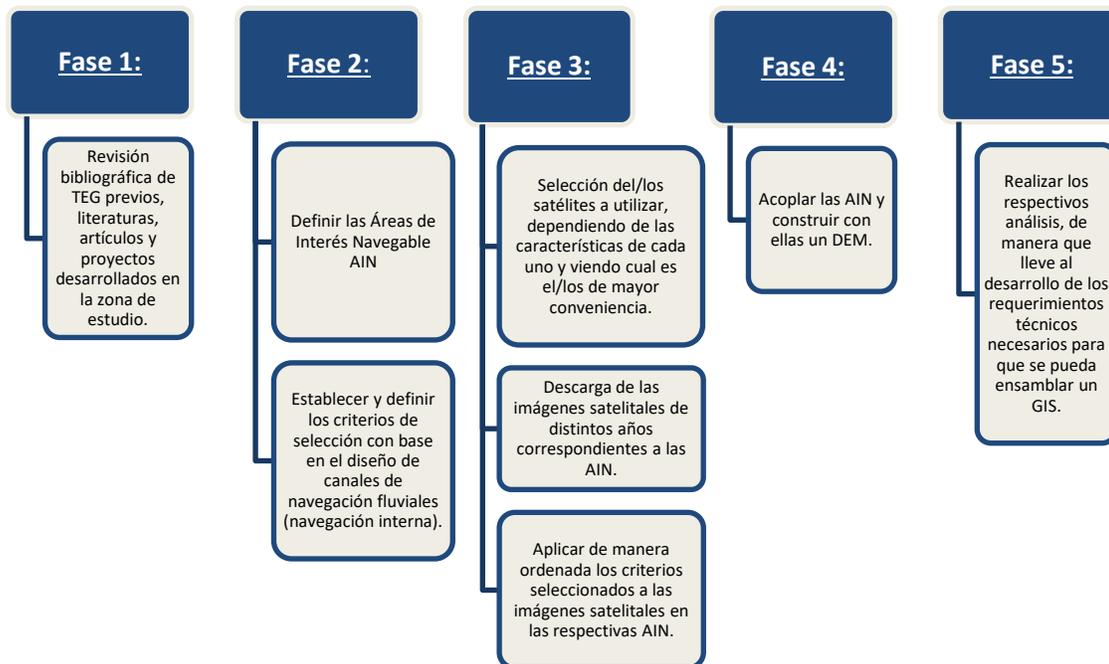


Figura. III-1: Diagrama de las fases de la investigación.

Elaboración propia

3.2.1.- Fase 1: Recopilación de información bibliográfica

Esta fase como su nombre lo indica se basa en la búsqueda de material bibliográfico, bien sea de trabajos de grado previos, proyectos, artículos, entre otros, desarrollados en la zona de estudio y que sirvan de apoyo para el trabajo de investigación que se quiere lograr.

Con esto en mente, se encuentran algunos documentos relevantes que contienen información acerca del río Casiquiare y el eje fluvial Orinoco-Casiquiare-Negro-Amazonas, la cual será usada para parte del desarrollo de la fase 2 y la fase 3, esta información se encuentra de manera resumida en el Capítulo II del presente trabajo. Dos de los documentos son los presentados en el año 1943 por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos (USACE) denominado “Orinoco-Casiquiare-Negro Waterway Venezuela-Colombia-Brazil”, proyecto en donde se plantean tanto propuestas para el uso adecuado de las vías fluviales del eje y su costo, como el posible tipo de embarcación a usar (embarcación de diseño); y el presentado en el año 2019 por Alain Laraque, Jose L. Lopez, Santiago Yepez y Paul Georgescu denominado “Water and Sediment Budget of Casiquiare Channel Linking Orinoco and Amazon Catchments, Venezuela”, en donde se realiza una revisión y síntesis del conocimiento hidrológico y sedimentológico del río Casiquiare, incluido el primer balance hidrosedimentario del sistema fluvial utilizando mediciones realizadas en la expedición de septiembre del año 2000 en la bifurcación y la boca del río.

3.2.2.- Fase 2: Selección de las AIN estableciendo previamente los criterios

En esta fase se persigue primeramente generar el concepto de Áreas de Interés Navegable (AIN), dentro del ámbito de la navegación fluvial, el cual va a tener una base firme de apoyo una vez se definan y establezcan los criterios, desarrollando de esta manera el primer objetivo específico de la investigación. Luego de fijar los criterios, se procederá a la selección e identificación de estas AIN sobre el río Casiquiare.

Los criterios establecidos para las AIN son:

- Geomorfológico: estará enfocado en determinar las zonas dinámicas y estables de las márgenes del río, empleando para ello telemetría satelital. Para este criterio se establece un período de estudio comprendido desde el año 2000

hasta la actualidad, dividido en dos partes, una primera que va desde el año 2000 al 2013 y una segunda desde el 2013 al 2020.

- Hidrosedimentario: serán utilizadas las mediciones tomadas en la expedición del año 2000 (al ser las últimas que se tienen de la zona de estudio) en la bifurcación y en la boca del río, las cuales involucran caudal, velocidad de superficie, ancho máximo del canal, profundidad máxima, temperatura, conductividad eléctrica, turbiedad, pH y concentración total de sedimentos suspendidos.
- Poblacional: se hará uso también de la telemetría satelital para este criterio, en donde se observarán las zonas pobladas que se han venido desarrollando y que actualmente se encuentran en las riberas o cercanías del río.

Con base en esto se seleccionaron seis (6) AIN, una en la bifurcación Orinoco-Casiquire, otra en la confluencia del Casiquire con el Guainía y cuatro más que se encuentran entre las dos primeras áreas.

3.2.3.- Fase 3: Aplicación de los criterios

Primeramente se deberá realizar la descarga de las imágenes satelitales correspondientes a las AIN y para ello se requiere seleccionar el o los satélites a utilizar según las características que presente cada uno. Estas características van a venir definidas principalmente por la disponibilidad de imágenes generadas por los satélites, ya que se busca que sean del mismo período de aguas (aguas bajas-período seco), la resolución espacial y el porcentaje de nubosidad.

Como se mencionó en el Capítulo II hay dos misiones satelitales, que son las de mayor relevancia a nivel mundial, la misión estadounidense Landsat y la europea Sentinel. Debido a que la misión Sentinel empezó a obtener las imágenes satelitales en el año 2014 y en este proyecto parte del análisis del río que se va a realizar va a ser desde el año 2000, esta misión queda descartada, quedando únicamente los satélites Landsat. Las imágenes procedentes de estos satélites se obtienen de forma gratuita en el portal del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Todas las imágenes que se descargan de este portal vienen

georreferenciadas en el sistema geográfico UTM (Universal Transverse Mercator) y elipsoide WGS 84 con corrección atmosférica y geométrica.

A continuación se presentan en una tabla algunas características de estos satélites:

Tabla III-1: Características de los satélites Landsat 7 y Landsat 8.

Características	Satélites	
	Landsat 7	Landsat 8
Disponibilidad de imágenes	1999 - Actualidad	2013 - Actualidad
Sensor	ETM+	OLI y TIRS
Altura de órbita	705 km	705 km
Resolución radiométrica	8 bits	16 bits
Resolución espectral	8 bandas	11 bandas
Resolución espacial	Bandas 1 a 7 – 30m Banda 8 – 15m	Bandas 1 a 7/9 a 11 – 30m Banda 8 – 15m
Frecuencia de nuevas imágenes	16 días	16 días
Tamaño de la imagen	170 km x 185 km	170 km x 185 km

Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla anterior ambos satélites presentan similares características, con sus excepciones en el tipo de sensor que utilizan y en las resoluciones radiométrica y espectral.

Es importante mencionar que el satélite Landsat 7 que ha provisto de información casi ininterrumpidamente desde su lanzamiento en el año 1999, en la actualidad presenta un problema a causa de una falla en el instrumento que corrige las líneas escaneadas, dando como resultado que todas las imágenes adquiridas desde el 14 de julio de 2003 contengan franjas de datos inválidos “*gaps*”, los cuales generan ausencia de información. Estos “*gaps*” provocan aproximadamente la pérdida de un 22% de la información de cada imagen, están dispuestos en franjas inclinadas hacia la izquierda, en cuyos bordes es donde se concentra la mayor pérdida de datos y esta va disminuyendo gradualmente camino al centro hasta desaparecer.

Teniendo en cuenta esto y dado que el análisis geomorfológico del río se hará desde el año 2000, se procedió a descargar del satélite Landsat 7 las imágenes correspondientes a la zona de estudio del año 2000 y del satélite Landsat 8 las imágenes de los años 2013 y 2020. Se descargaron dos imágenes satelitales por cada año (2000, 2013 y 2020), ya que con las dos se abarca casi la totalidad del río y por lo tanto sirven para el análisis que se le hará a las AIN, procurando que todas sean del mismo período de aguas (aguas bajas, de noviembre a abril aproximadamente)

Siguiendo el orden de los criterios, se aplicará primero el geomorfológico, en donde se generará el contorno de las márgenes del río correspondientes a las AIN para las imágenes satelitales de cada año de estudio, haciendo un contraste con ellas para observar la evolución que ha tenido a lo largo del tiempo y determinar así zonas dinámicas y estables.

Para el segundo criterio (hidrosedimentario), se tienen mediciones hidráulicas de dos de las AIN (la bifurcación y la confluencia del río Casiquiare), realizadas una en el año 1943 por parte del USACE y otra en el 2000 por parte de una expedición realizada en ese año. Ambas mediciones no son comparables ya que la primera se realizó en marzo y la segunda en septiembre, es decir, una en período de sequía y otra en período de lluvia respectivamente, aparte de la gran diferencia de tiempo que tienen ambas. Sin embargo se usarán las últimas mediciones obtenidas sobre estas dos AIN del río, tres en la bifurcación (aguas arriba y aguas abajo de ésta y otra en la boca del Casiquiare) y tres en la confluencia (en la desembocadura del Casiquiare, en el Guanía y en el río Negro), representándolas sobre la imagen satelital.

Cabe acotar que el equipo utilizado en la expedición mencionada fue un pequeño bote provisto de un ecosonda junto con un GPS, un turbidímetro, un termómetro, un medidor de pH portátil y un medidor de conductividad. Es importante señalar también como fue el muestreo y la toma de estas mediciones, por lo tanto se explican a continuación. Las fisicoquímicas se realizaron en tres puntos en la vertical (superficie, medio e inferior) en el centro del río. El sedimento total suspendido (TSS) fue recogido con una muestra de 500 ml. Para la medición del caudal, primero, llevaron a cabo un levantamiento batimétrico utilizando el ecosonda y el GPS para así obtener el área de flujo en cada sección respectiva del río. La velocidad del flujo la determinaron utilizando la embarcación (canoas) como

flotador a la deriva en tres líneas longitudinales distribuidas al 25%, 50% y 75% de la distancia a la orilla de la sección. El GPS proporcionó la velocidad de deriva de esta canoa (velocidad en la superficie) y por lo tanto, la velocidad promedio de la sección de flujo fue calculada aplicando un coeficiente de corrección entre 0.8 y 0.95, generalmente aceptado para este tipo de curso de agua. Teniendo el área de la sección y la velocidad, el caudal lo obtuvieron multiplicando ambos valores, ahora con el producto de este caudal (en m^3/s) y las concentraciones promedio de TSS medidas (en mg/L) calcularon los flujos de material (en kg/s).

En el tercer y último criterio, el poblacional, se aportará otra capa de información adicional dedicada a observar y señalar en las AIN las poblaciones que se encuentran en las proximidades del río. Para esto y a manera de referencia se usará el visualizador del servidor del USGS y el programa Google Earth en su versión gratuita, los cuales permitirán tener una visión clara de estas áreas. No se podrá realizar una evolución de las AIN con respecto a este criterio debido a que las imágenes satelitales de los distintos años no permiten observar claramente la localización de estas poblaciones.

Para la aplicación de estos criterios se usará el software libre y de código abierto QGIS versión 3.10, proyecto oficial de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo), el cual es un completo sistema que permite recopilar, organizar, editar y analizar información geoespacial.

A las imágenes satelitales se le aplicará un refinado pancromático, también con el uso del software QGIS, en donde se mejora la resolución de ellas utilizando como referencia la banda pancromática (banda 8) de mejor resolución. Esta técnica consiste en combinar primero tres de las bandas del satélite (para el proyecto se usaron las bandas 4, 5 y 6) para formar una imagen multiespectral y ésta a su vez combinarla con la banda pancromática generando una imagen con una resolución espacial de 15 metros.

Con esta fase o etapa se aborda y desarrolla el segundo objetivo específico de la investigación correspondiente al contraste de las AIN empleando telemetría satelital.

3.2.4.- Fase 4: Construcción de un Modelo Digital de Elevación (DEM)

La Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) participaron en un proyecto internacional para adquirir datos de elevación topográfica estereoscópica que se utilizaron para crear el primer conjunto de elevaciones terrestres casi global. Este proyecto se denominó Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), fue un sistema de radar que voló a bordo del transbordador espacial Endeavour del 11 al 22 de febrero del año 2000, recopilando con éxito mapas topográficos digitales de alta resolución en más del 80% de la superficie de la Tierra.

Habiendo dicho esto y sabiendo que un DEM es una estructura de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno, en esta fase se realizará la construcción de un DEM con la integración de nueve (9) DEMs más pequeños que abarcan la totalidad de la zona de estudio, descargados de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Estos modelos digitales de elevación forman parte del registro de la SRTM cuya fecha de adquisición fue el 11 de febrero del año 2000 con una resolución de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 metros).

Con la ayuda del software QGIS se generará el mosaico de los DEMs y una vez integrados con el uso de las herramientas del software se proporcionará un mapa de sombras (utilizando luz y sombra para proveer un aspecto más tridimensional en el relieve del terreno).

3.2.5.- Fase 5: Requerimientos técnicos

En esta fase se desarrollaría el cuarto y último objetivo específico de la investigación, al buscar establecer los requerimientos técnicos para ensamblar un Sistema de Información Geográfica (GIS) acorde al concepto de las AIN.

Un GIS es un sistema de información digital que pertenece a la categoría de Sistemas de Información Espaciales, los cuales tienen la capacidad de capturar, procesar, analizar y reportar en forma gráfica información de tipo espacial. La distinción entre un GIS y un sistema de información convencional, es que el primero maneja información bajo un contexto espacial dentro de un marco de referencia geográfico. En este sentido el componente principal de un GIS es el dato o base de datos espaciales y su plano de

orientación es la superficie de la tierra. En términos generales se puede definir como dato espacial a un dato ubicado en un espacio determinado mediante un sistema pre-definido de coordenadas y el cual puede ser descrito mediante una serie de atributos y su relación con respecto a otros datos, en un mismo plano, puede ser establecida.

Sabiendo esto, los requerimientos técnicos o datos necesarios para generar el GIS van a venir constituidos por la integración de los criterios expuestos en las fases 2 y 3 y por lo realizado en la fase 4, es decir, la base de datos va a estar formada por la aplicación en conjunto de los criterios geomorfológico, hidrosedimentario y poblacional para cada AIN planteada, aunado a la elaboración del Modelo Digital de Elevación. Esta base de datos podrá ser actualizada a futuro con nueva información y ampliada en lo que respecta a los criterios analizados.

Para el desarrollo de esta fase es necesario e importante disponer de una plataforma de software GIS, por lo tanto se usará el software libre QGIS, utilizado también para las fases anteriores.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

El concepto de AIN a desarrollar va a ir ajustado al diseño de canales de navegación fluvial, por ende es importante destacar que el diseño de un canal de navegación se enfoca en dos procesos macro de estudio, que son el diseño conceptual o preliminar y el diseño de detalle, el primero consiste en recopilar la documentación existente del lugar de estudio y de alguna manera justificar el proyecto y el segundo contempla un estudio más técnico y detallado con el propósito de levantar la información de campo necesaria para el diseño de la vía.

En este orden de ideas, se define un **Área de Interés Navegable AIN** como: celdas de información que sintetizan los datos necesarios para el diseño y desarrollo de un canal de navegación fluvial en un Sistema de Información Geográfica.

Este concepto se encuentra sujeto a los criterios geomorfológico, hidrosedimentario y poblacional, los cuales engloban una cierta cantidad de datos como la morfología (zonas dinámicas y estables), la geometría del cauce, caudales, velocidades, datos fisicoquímicos, datos sedimentológicos y datos poblacionales, tomando un tramo de río como su objetivo de actuación primordial y siendo estos tramos, áreas singulares que ameritan especial atención, por lo tanto, se podría decir que el concepto abarca parte del diseño conceptual y parte del diseño de detalle.

En esta investigación se trabajaron solo los tres criterios mencionados anteriormente aplicados sobre el río Casiquiare, pero el concepto de AIN no quita la posibilidad de que en futuros proyectos se puedan incorporar nuevos criterios y que sean aplicados a otros ríos.

Una vez desarrollado el concepto de las AIN y definidos los criterios, se seleccionaron seis (6) AIN, las cuales se aprecian en la siguiente figura:

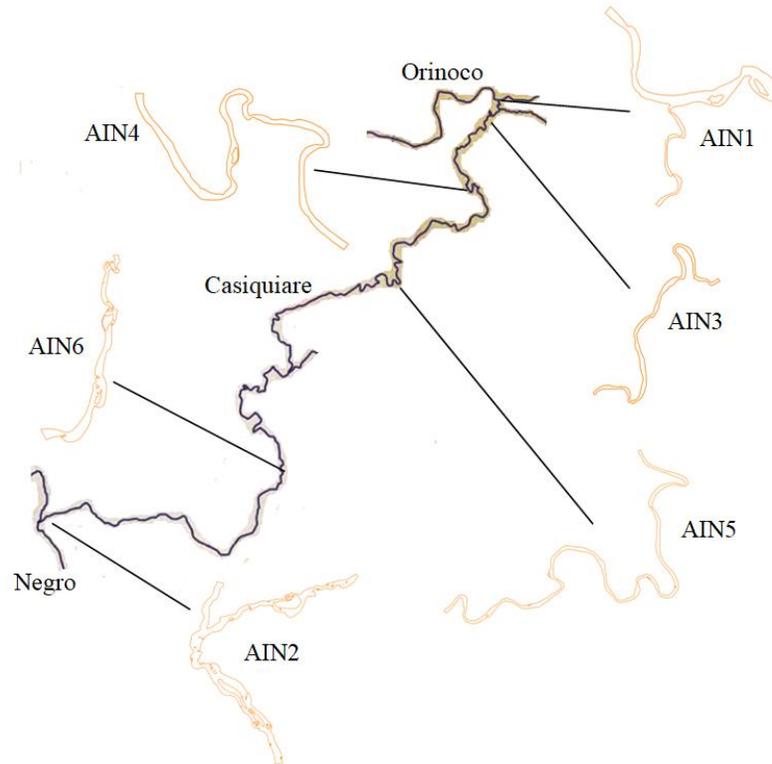


Figura. IV-1: Visualización de las Áreas de Interés Navegable.

Elaboración propia

Posteriormente se realizó la descarga de solo dos imágenes satelitales por cada año (dando un total de seis), debido a que abarcaban casi la totalidad del río entre ambas. Las imágenes se obtuvieron de forma gratuita de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), éstas presentan ciertas características de gran relevancia que las definen, como por ejemplo: la fecha en que se tomaron, ya que era importante que fueran del mismo mes o por lo menos del mismo período de aguas; la resolución espacial, la cual depende de las características de los satélites a usar y que en este caso ambos contienen una banda pancromática que proporciona una mejor resolución (15 metros) entre todas las bandas que poseen; y el porcentaje de nubosidad, muy importante también porque se buscaba un porcentaje bajo o en caso de no ser así tratar que las nubes de la imagen no se encontraran cubriendo el río (caso que ocurre con la imagen 2 del año 2013 como se aprecia en la Tabla IV-1). A continuación se presentan algunas de las características de estas imágenes descargadas:

Tabla IV-1: Características de las imágenes satelitales descargadas.

Características	Imágenes					
	1	2	1	2	1	2
Satélite	Landsat 7	Landsat 7	Landsat 8	Landsat 8	Landsat 8	Landsat 8
Fecha de adquisición	24/11/2000	17/12/2000	20/11/2013	27/11/2013	08/01/2020	31/01/2020
Datum	WGS84	WGS84	WGS84	WGS84	WGS84	WGS84
Zona UTM	20	19	20	19	20	19
% de nubosidad	11%	2%	11%	49%	3%	34%

Elaboración propia

Es importante mencionar que en la porción del río (entre el AIN5 y el AIN6) no abarcada por las dos imágenes satelitales descargadas por año, se hubiese podido extraer hasta dos (2) AIN adicionales. Esto no se logró realizar debido a que las imágenes satelitales que abarcaban esa parte del río se encontraban cubiertas con una gran cantidad de nubes, imposibilitando así el análisis que se quiere lograr.

Al tener ubicadas las AIN a lo largo del río se procedió a la aplicación de los criterios en cada una de ellas, para esto se dividió el proceso en tres partes, que representan el número de criterios, comenzando por el geomorfológico, posteriormente el hidrosedimentario y por último el poblacional.

➤ **Criterio geomorfológico**

Siguiendo el método (Fase 3), primero se demarcaron las márgenes del río por cada año y para cada AIN, tal como se muestra a continuación. De rojo se encuentran delimitadas las del año 2000, de color cian las del año 2013 y de color naranja las del 2020. Cabe acotar que debido a la resolución de las imágenes satelitales la delimitación de las márgenes presenta un error de 15 metros, por lo que sirve para dar una tendencia aproximada de la evolución del río. Habiendo dicho esto, no se apreciaron cambios en uno de los períodos de tiempo en tres AIN, para el período 2000-2013 las AIN2 y AIN6 permanecieron iguales y lo mismo ocurrió con el AIN3 pero para el período 2013-2020, por lo tanto para estas áreas el análisis que se realizó fue entre los años 2000 y 2020.

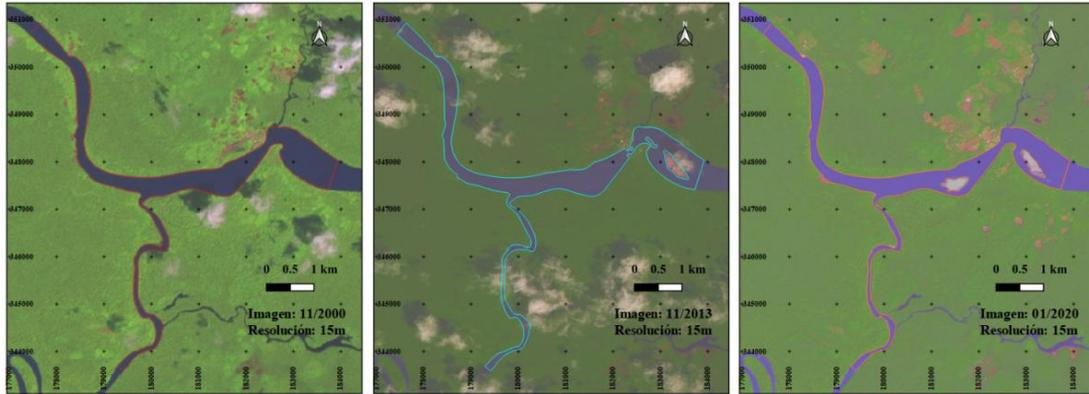


Figura. IV-2: Márgenes del AIN1.

Elaboración propia

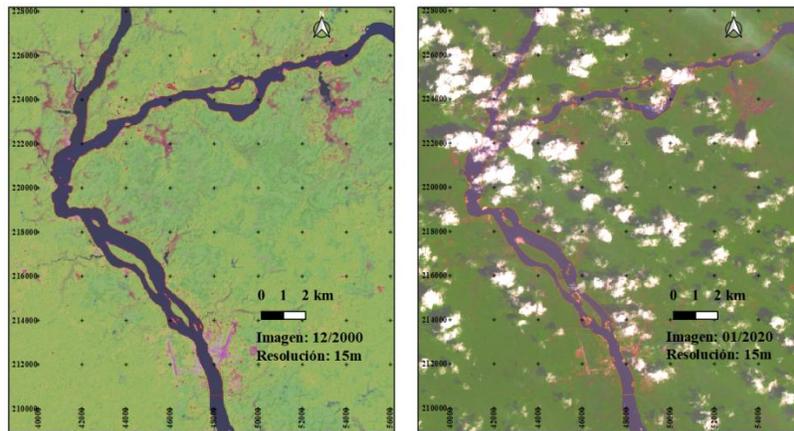


Figura. IV-3: Márgenes del AIN2.

Elaboración propia

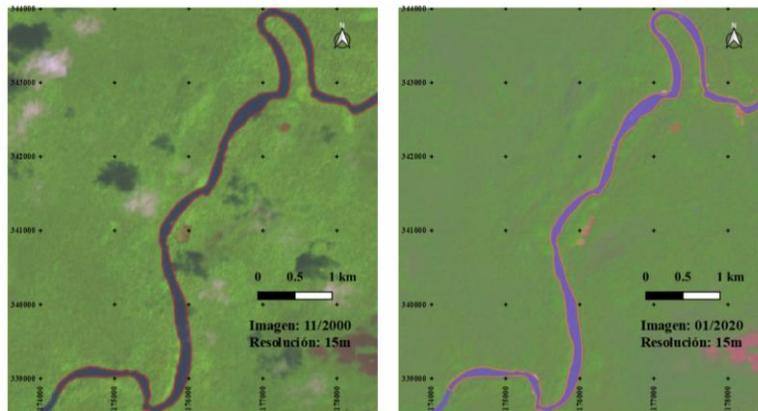


Figura. IV-4: Márgenes del AIN3.

Elaboración propia

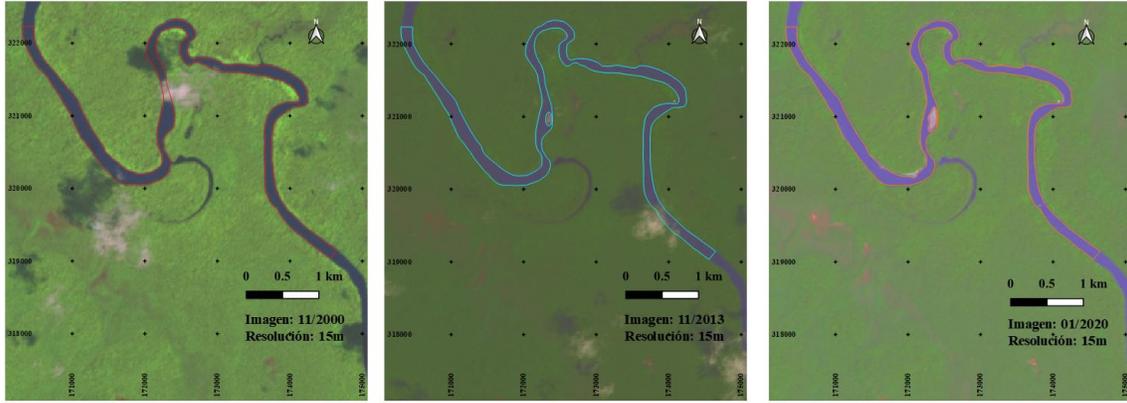


Figura. IV-5: Márgenes del AIN4.

Elaboración propia

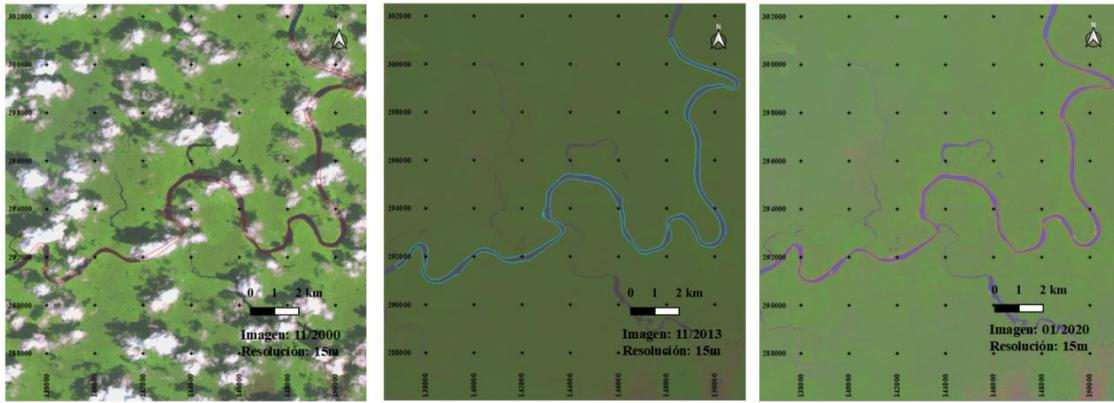


Figura. IV-6: Márgenes del AIN5.

Elaboración propia

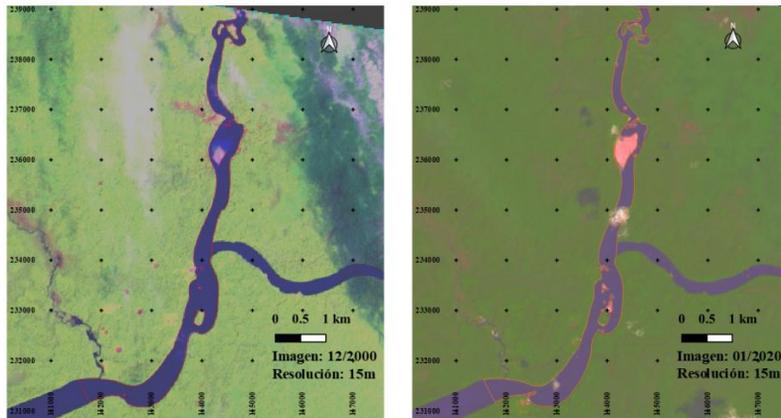


Figura. IV-7: Márgenes del AIN6.

Elaboración propia

Posteriormente a la delimitación de las márgenes se realizó el contraste de ellas para poder observar y analizar las zonas en donde el río sufre cambios y donde se mantiene estable.

En el **AIN1**, cuya ubicación es en la bifurcación del Alto Orinoco, se detectaron cuatro zonas dinámicas para el período 2000-2013 y cuatro zonas también para el período 2013-2020, las cuales se muestran en la figura siguiente:

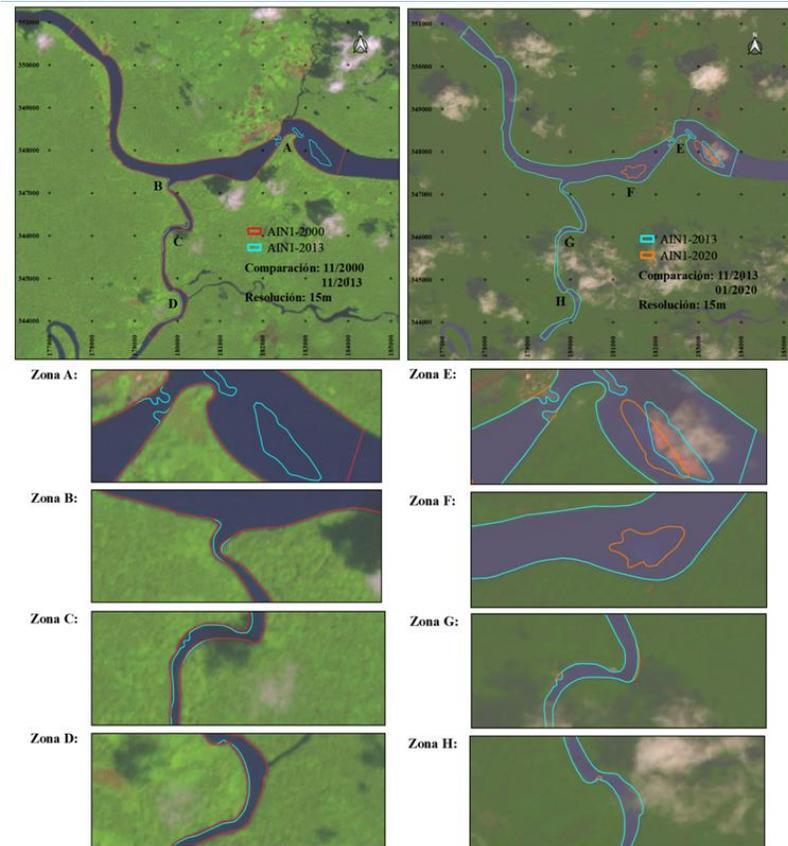


Figura. IV-8: Contraste AINI, períodos 2000-2013 y 2013-2020.

Elaboración propia

La zona A se encuentra en el río Orinoco a poca distancia aguas arriba del poblado de Tamatama, en la zona aparecen dos grandes bancos de arena ubicados aproximadamente en la mitad del ancho del río y también se observan tanto en la margen izquierda como en la derecha una acumulación de sedimentos generando una gran obstrucción. En la zona B, justo en la bifurcación, ocurre en las márgenes del Casiquiare un pequeño desplazamiento

hacia la izquierda, es decir, sufren un proceso de sedimentación y erosión en las márgenes derecha e izquierda respectivamente. En las zonas C y D, correspondientes a meandros, se puede observar como la margen derecha del río en ambas zonas se sedimenta, desplazando este lado hacia la izquierda. Ahora en la comparación entre los años 2013 y 2020, aparece la zona E en donde se aprecia primero que la acumulación de sedimentos en las márgenes que ocurre en la zona A del período anterior se erosiona, volviendo a como estaba en el año 2000 y segundo que uno de los bancos de arena se desplaza hacia la izquierda, probablemente porque parte de él se encontraba sumergido y el transporte y acumulación de sedimentos en ese lado del río ayudó a que quedara a la vista esa parte, quedando la otra sumergida o erosionada. Luego en la zona F aparece otro banco de arena similar en tamaño a los anteriores y casi en la mitad del cauce. Las dos zonas restantes en comparación con las C y D mencionadas anteriormente, presentan una pequeña erosión y sedimentación en la margen derecha y una erosión en la margen izquierda de la zona G. Aguas abajo de la bifurcación el Orinoco permanece estable en ambas orillas del río. Para una mejor visualización del contraste observar el Anexo 1.

En el **AIN2**, cuya ubicación es en la confluencia entre el río Casiquiare y el Guanía, tomando parte también del río Negro, hay siete zonas dinámicas para la comparación realizada entre el año 2000 y el 2020. Como se comentó anteriormente, se tomó este período de tiempo ya que no hubo cambios apreciables para el período 2000-2013. A continuación el contraste realizado para el AIN2:

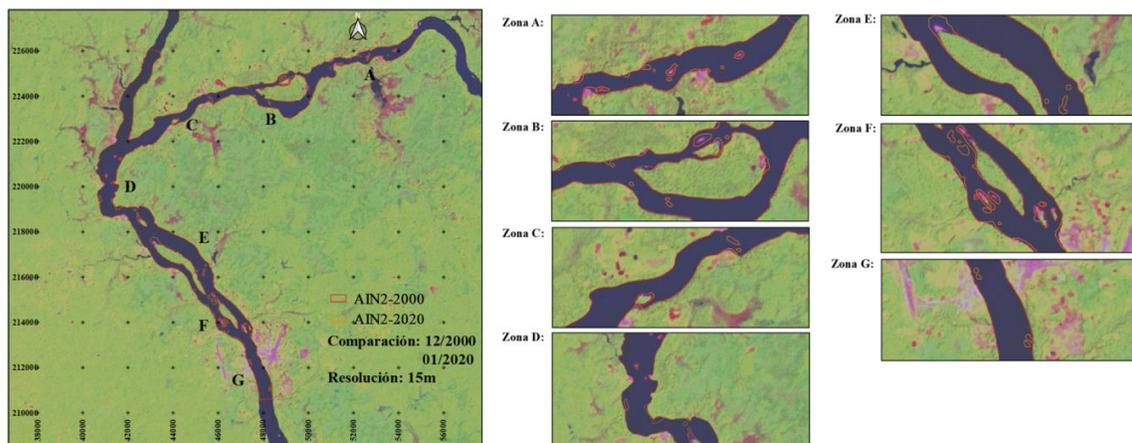


Figura. IV-9: Contraste AIN2, período 2000-2020.

Elaboración propia

Las zonas A, B y C se ubican en el Casiquiare y las D, E, F y G en el río Negro, mientras que la porción que se toma del Guainía permanece estable. Esta AIN en particular presenta en toda su extensión numerosos escollos tales como rocas o bancos de arena que pueden interrumpir la navegación, aparte de las grandes islas que hay tanto en el Casiquiare como en el río Negro. Para el buen funcionamiento de un posible canal de navegación habría que realizar algunas voladuras de estos escollos e inclusive el dragado de sedimentos en algunas de las zonas. En esta AIN no se observa erosión alguna, más bien en todas las zonas a excepción de las E y G hay sedimentación en ambas márgenes del río. Se puede observar también en todas las zonas que aparecen nuevos obstáculos o peligros para la navegación con las rocas o bancos de sedimentos que afloran en la superficie, aparte de la ampliación de los que ya se encontraban; las islas por su parte representan en el año 2020 mayor superficie en algunas partes de ellas que las visualizadas en el 2000. Para una mejor visualización del contraste observar el Anexo 2.

El **AIN3** es la primera de las cuatro áreas que se encuentran entre la bifurcación y la confluencia. Al igual que en el AIN2, aquí no se apreciaron cambios en uno de los períodos de análisis (2013-2020), por lo tanto también se realizó el contraste entre los años 2000 y 2020, tal como se observa en la figura siguiente:



Figura. IV-10: Contraste AIN3, período 2000-2020.

Elaboración propia

Aquí se visualizan tres zonas dinámicas, que a falta de obstáculos para la navegación se encuentran amplias zonas de sedimentación y erosión en las márgenes del río. La zona A representa un meandro muy cerrado, en el cual se observa que hay un ligero desplazamiento de éste hacia la derecha, por lo tanto hay presencia de sedimentación y erosión en cada orilla del río. En la zona B solo hay sedimentación en la margen derecha, no es muy pronunciada pero ocupa un largo trayecto. La zona C al igual que la A, es un meandro cerrado con un pequeño radio de curvatura, inconveniente que hay que tener en cuenta en el momento del diseño de canal de navegación, aquí el ancho del río se reduce, presentando sedimentación tanto en la margen derecha como en la izquierda. Para una mejor visualización del contraste observar el Anexo 3.

El **AIN4** es la segunda de las cuatro que se encuentran entre la boca y la desembocadura del río Casiquiare, ésta retoma el análisis de los períodos 2000-2013 y 2013-2020 y se pueden observar tres zonas dinámicas para cada uno de ellos:

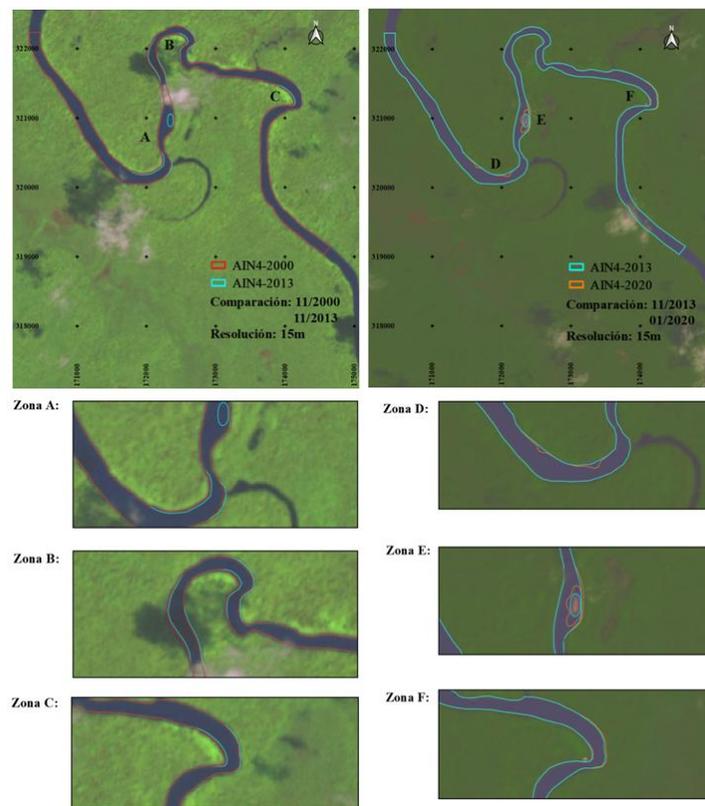


Figura. IV-11: Contraste AIN4, períodos 2000-2013 y 2013-2020.

Elaboración propia

Esta AIN presenta fuertes meandros irregulares con radios de curvatura pequeños, lo cual es un serio inconveniente para la navegación ya que la eslora de la embarcación que transite no debe de ser muy grande. La zona A es el primer meandro presente en esta AIN y en ella se puede observar un comportamiento característico de estas curvas, se trata de una tendencia a la sedimentación de la parte interna y tendencia a la erosión en la parte externa; también se aprecia el afloramiento de un banco de arena que ocupa parte importante del ancho del río. En esta zona, antes del primer período de estudio, el meandro evolucionó hasta su punto final el cual fue el estrangulamiento, se observa claramente la formación de un atajo y el abandono del lóbulo. En la zona B el meandro casi en su totalidad se desplaza hacia la derecha, es decir, hay sedimentación y erosión en ambas márgenes del río. En la zona C, al igual que la A, parte de la curva se mueve hacia la derecha, con sedimentación en el lado interno y erosión en el externo. En la comparación 2013-2020 aparece la zona D en donde hay presencia de sedimentación en la margen izquierda. Continuando con este mismo período de tiempo, se encuentran las zonas E y F, en la primera el banco de arena que afloró en el período pasado expande su superficie ocupando aún más espacio y en la segunda, la parte final del lóbulo se desplaza más hacia la derecha en comparación con la zona C. Para una mejor visualización del contraste observar el Anexo 4.

El **AIN5** es un área también con meandros irregulares, presenta tres zonas dinámicas para el período de estudio 2000-2013 y cuatro para el período 2013-2020. Para el primer período, la imagen satelital descargada del año 2000 a pesar de tener poco porcentaje de nubosidad (11%), gran parte de las nubes se encuentra en esta AIN, pero sin embargo se logran observar claramente tres zonas de cambios geomorfológicos, en dos de ellas, la A y C, gran parte de sus trayectos curvos se desplazan hacia la izquierda y derecha respectivamente presentando en ambas márgenes tanto sedimentación como erosión; mientras que en la zona B solo una porción de la margen derecha se sedimenta. Se puede ver que aguas arriba de esta última zona, hace un tiempo atrás, hubo un corte natural del meandro, dejando abandonada esta porción de río en forma de herradura. En las zonas D, E y G no hay erosión alguna y salen a la vista de manera dispersa algunos escollos y parte de las márgenes sedimentadas. La zona F presenta sedimentación justo en la desembocadura de un pequeño afluente del Casiquiare, pequeño en comparación con los cuatro principales. Para una mejor visualización del contraste observar el Anexo 5.

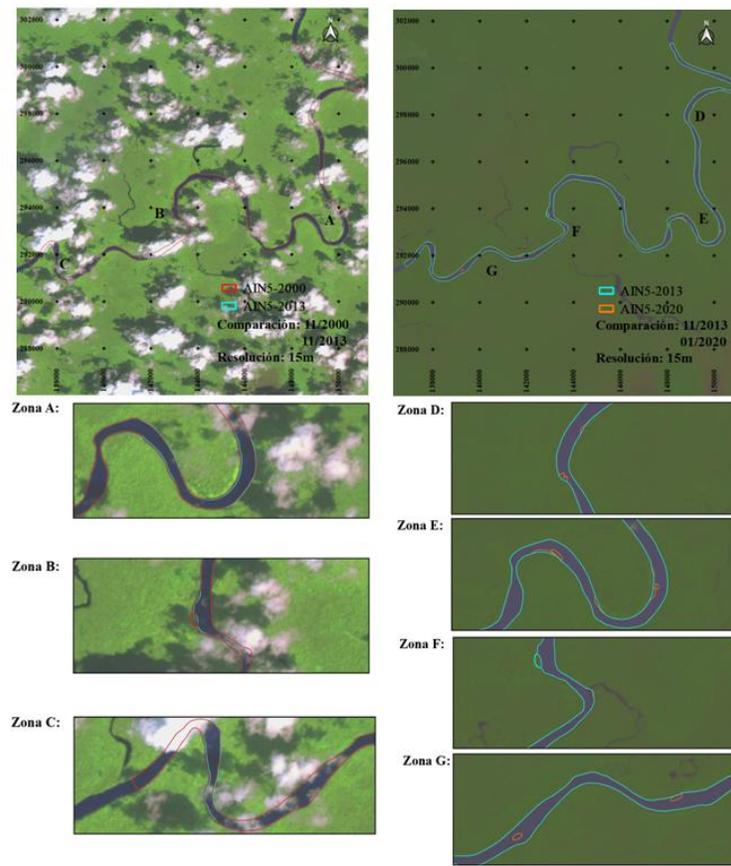


Figura. IV-12: Contraste AIN5, períodos 2000-2013 y 2013-2020.

Elaboración propia

El **AIN6** es la última área antes de la confluencia del Casiquiare con el Guanúa, en ella desemboca uno de los principales afluentes del Casiquiare, el río Siapa. De igual manera que el AIN2 no hay cambios apreciables en el período 2000-2013, por lo que el estudio se realiza para el 2000-2020. Como se observa en la figura siguiente, esta AIN presenta cuatro zonas dinámicas, empezando por la A, en donde aparte de la sedimentación que ocurre en ambas márgenes, hay dos islas que con el paso del tiempo se fueron sedimentando en algunas regiones abarcando casi la totalidad del ancho del río y generando un gran obstáculo para la navegación. En las zonas B, C y D, separadas las tres por un buen trayecto estable, ocurre lo mismo, en algunas partes las márgenes se sedimentan y las islas, bancos de arena y afloramientos rocosos que ya se apreciaban salen más a la vista ocupando más

espacio y obstruyendo gran parte del cauce. Para una mejor visualización del contraste observar el Anexo 6.

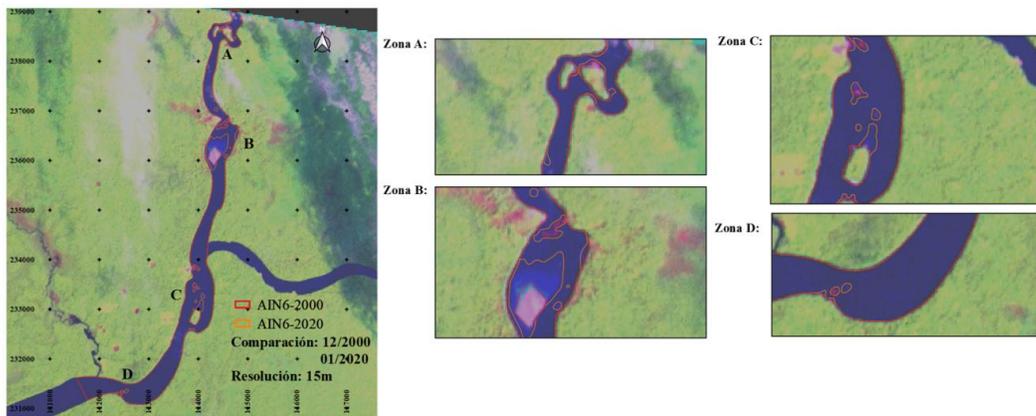


Figura. IV-13: Contraste AIN6, período 2000-2020.

Elaboración propia

Para terminar con el estudio del criterio geomorfológico, con base en la visualización y descripción realizada en el contraste de todas las AIN se procedió a demarcar en las riberas del río las zonas dinámicas en color rojo y las estables en color amarillo, tal como se presenta a continuación:

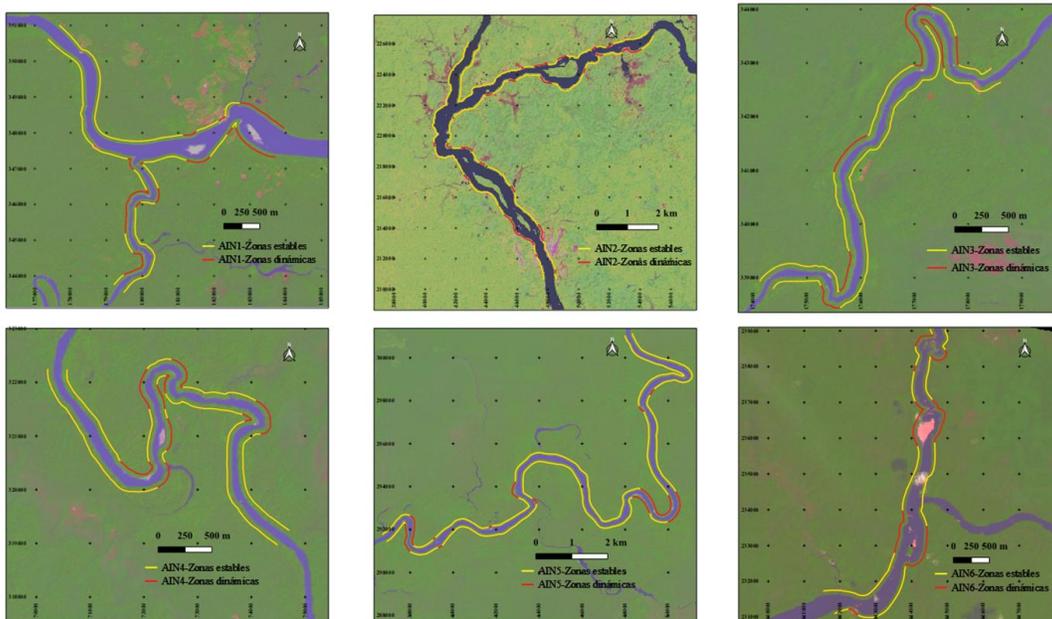


Figura. IV-14: Zonas dinámicas y estables de las AIN.

Elaboración propia

Un mejor detalle de la figura anterior se encuentra en el Anexo 7. En general se puede observar que en lo referente a la geomorfología del río, el Casiquiare es bastante estable, ya que en las seis AIN presentadas, las zonas dinámicas representan un bajo porcentaje de la longitud total de cada una (25% en promedio aproximadamente) en comparación con las zonas estables, sin embargo para un buen desarrollo de la navegación en este río en futuros proyectos habrá que tener muy en cuenta estas zonas que son las que tienen tendencia a cambios geomorfológicos y en donde se tendrá que evaluar la realización de obras de estabilización de las márgenes, así como también operaciones de dragado, voladuras y remoción de las rocas, ampliación de las curvas de radios pequeños, entre otra serie de actividades necesarias.

➤ **Criterio hidrosedimentario**

Como se ha venido mencionando, durante la expedición de septiembre del año 2000, se realizaron mediciones batimétricas, de descarga y de perfil fisicoquímico a lo largo de seis secciones, tres en la bifurcación y tres en la confluencia, correspondientes al AIN1 y al AIN2 respectivamente.

Luego de haber explicado, en la Fase 3 del tercer Capítulo, cómo y dónde se obtuvieron estas mediciones, con ellas se procederá a la aplicación de este criterio, el cual básicamente consiste en ubicar sobre las imágenes satelitales la información hidráulica, fisicoquímica y sedimentológica que se tiene de estas áreas y realizar un análisis general.

Esto se realizó a manera de referencia ya que no se tienen las coordenadas exactas de las secciones del río donde se tomaron las mediciones.

Es importante destacar que en el momento del estudio, el Casiquiare desvía alrededor del 30% del caudal del río Orinoco Superior, como se puede observar en los datos de campo (septiembre 2000) contenidos en la Figura IV-15 y con mejor detalle en el Anexo 8. Las secciones S1 (Orinoco aguas arriba), S2 (Orinoco aguas abajo) y S3 (Casiquiare en la entrada) se encuentran ubicadas en el AIN1, y en el AIN2 se encuentran las secciones S4 (Casiquiare en la salida), S5 (Guanía antes de la confluencia) y S6 (río Negro en San Carlos).

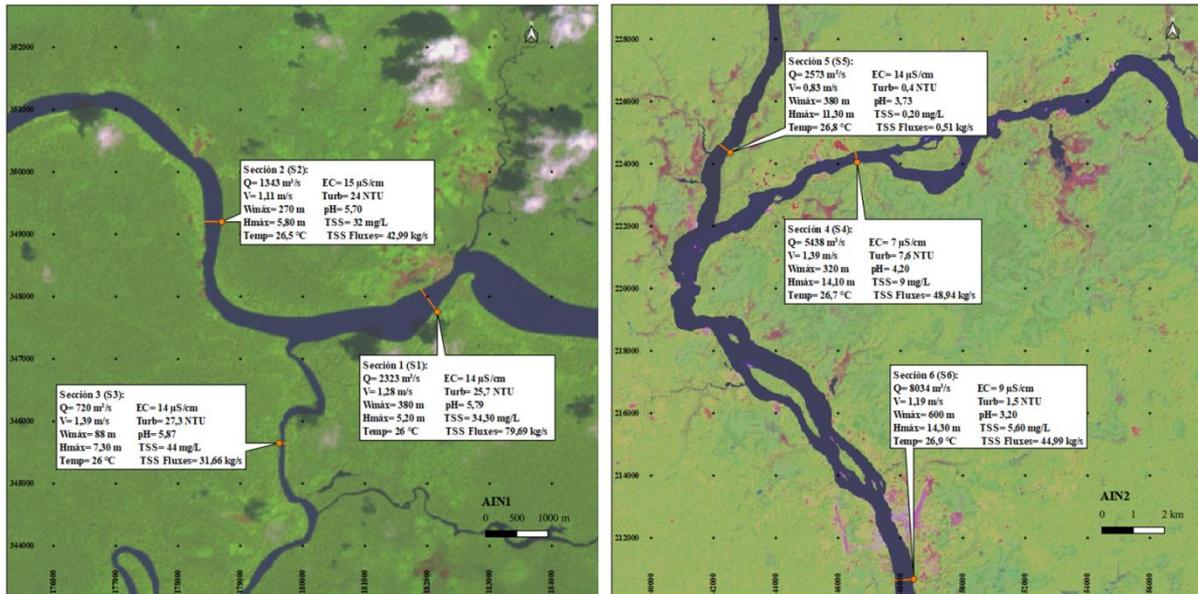


Figura. IV-15: Mediciones representadas en las AIN1 y AIN2.

Elaboración propia

Comenzando con el **AIN1**, el Orinoco tiene anchos de 380m y 270m, en S1 y S2 respectivamente, mientras que el Casiquiare, en S3, tiene un ancho mucho más pequeño de 88m, pero este último presenta una mayor profundidad y velocidad (7,30m y 1,39m/s) que el Orinoco en las dos secciones (5,20m y 1,28m/s; 5,80m y 1,11m/s). El área de S3 corresponde a aproximadamente el 28,5% de S1 y el 42,8% de S2. Los valores de conductividad eléctrica, turbiedad y pH son similares en las tres secciones. Se observa un valor más alto de sedimentos totales suspendidos (TSS) en la S3 probablemente por el aumento de las velocidades de flujo, lo que resulta en una resuspensión de partículas. Aquí el balance de agua se completa en casi 90% (2063 m³/s en lugar de 2323 m³/s) y el balance de flujo de sedimentos en 94% (74,65 kg/s en lugar de 79,69 kg/s).

En el **AIN2** el río Negro (S6) es el que presenta mayor ancho, profundidad y caudal. Las secciones S4 y S5 son similares morfológicamente, por lo que se puede decir que la diferencia de caudal (poco más del doble por parte de la S4) entre ambas secciones se debe principalmente a su velocidad de flujo 1,67 veces mayor en comparación con la S5. La

conductividad eléctrica de la S5 es dos veces mayor que la de la S4, caso contrario a lo que ocurre con la concentración de TSS en donde el Guainía (S5), acabando de atravesar una enorme llanura forestal, presenta muy poca carga de TSS en comparación con el Casiquiare (S4) en donde parte de la carga proviene del Orinoco. El balance de agua se completa en casi 100% ($8011 \text{ m}^3/\text{s}$ en lugar de $8034 \text{ m}^3/\text{s}$) y el balance de flujo de sedimentos en 91% ($49,50 \text{ kg/s}$ en lugar de $44,99 \text{ kg/s}$).

Es posible que las diferencias en cuanto a los balances se deban al protocolo de medición. Dicho esto, es razonable suponer que la ley de conservación de la masa se cumple, tanto en la bifurcación como en la confluencia.

Ahora comparando las dos secciones del Casiquiare, el caudal de la S4 es 7,5 veces mayor que la S3, debido a profundidades y anchos máximos que son mayores por más del doble, mientras que la velocidad de flujo permanece constante a lo largo del río con $1,39 \text{ m/s}$. Esta velocidad es mayor que en las otras cuatro secciones (S1, S2, S5 y S6), probablemente como consecuencia de la diferencia de elevación del Casiquiare y de la gran contribución de sus afluentes, los cuales ingresan un flujo total de $4718 \text{ m}^3/\text{s}$. Con respecto al flujo de sedimentos, estos no varían tanto en comparación con el caudal, siendo tan solo 1,5 veces más alto en la salida que en la entrada, ya que bajan considerablemente las concentraciones de TSS a la salida.

En la imagen no se observa el color del agua, pero inicialmente las aguas del Casiquiare son de color marrón claro y a medida que se avanza hasta su desembocadura, las aguas se vuelven más ácidas, es decir, más negras. El aporte de los afluentes del Casiquiare tienen un pH ácido, varios autores comentan que inclusive más que el Guainía. La acidez es el contenido de hidrógeno en el agua, por lo tanto, mientras más ácida más oscura es.

Por último, los valores de conductividad eléctrica, turbiedad y pH disminuyeron desde la S3 hasta la S4, esto se debe a lo mencionado anteriormente, en donde los afluentes al haber drenado el bosque y llanuras pantanosas en su margen izquierda, hacen que las aguas del Casiquiare durante su viaje adquieran pH más ácidos, menor turbiedad y menor conductividad, pareciéndose cada vez más a los ríos de “aguas oscuras” de la cuenca del Amazonas.

➤ **Criterio poblacional**

Este criterio básicamente pretende señalar en las Áreas de Interés Navegable las poblaciones que se encuentran en las cercanías de los ríos Orinoco, Casiquiare y Negro. Como guía para la aplicación de este criterio se usará el programa Google Earth en su versión gratuita y el visualizador del servidor del USGS, con el fin de observar con mejor claridad la ubicación de las poblaciones. En Google Earth se encuentran algunas de estas poblaciones ya ubicadas con sus nombres, pero no en todas las AIN (AIN2 y AIN6) aparecen zonas pobladas que si se pudieron visualizar en la página del USGS.

A continuación se presentan las poblaciones localizadas en las AIN, las cuales también se pueden observar en el Anexo 9.

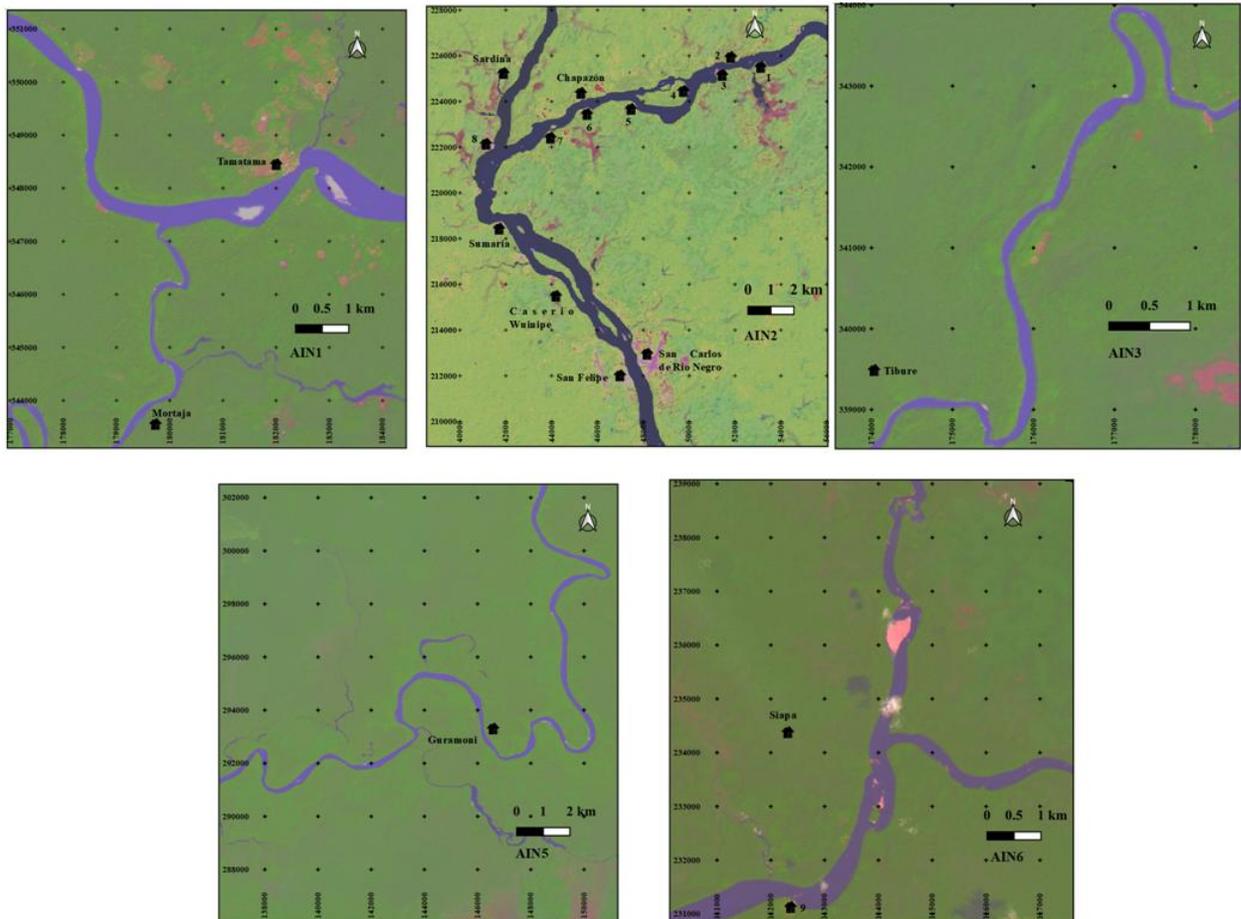


Figura. IV-16: Poblaciones en las AIN.

Elaboración propia

Es importante señalar que en el AIN4 no se encontraron zonas pobladas y por eso no se muestra esta área en la imagen anterior. Aquellas que aparecen con su nombre son las que se ubicaron con la ayuda de Google Earth y las que no, es decir, las que no se encontraban en este primer programa pero se lograron visualizar en la página del USGS se le asignó un número del uno (1) al nueve (9), las primeras ocho en el AIN2 y la número nueve en el AIN6, como se muestra en la siguiente figura:

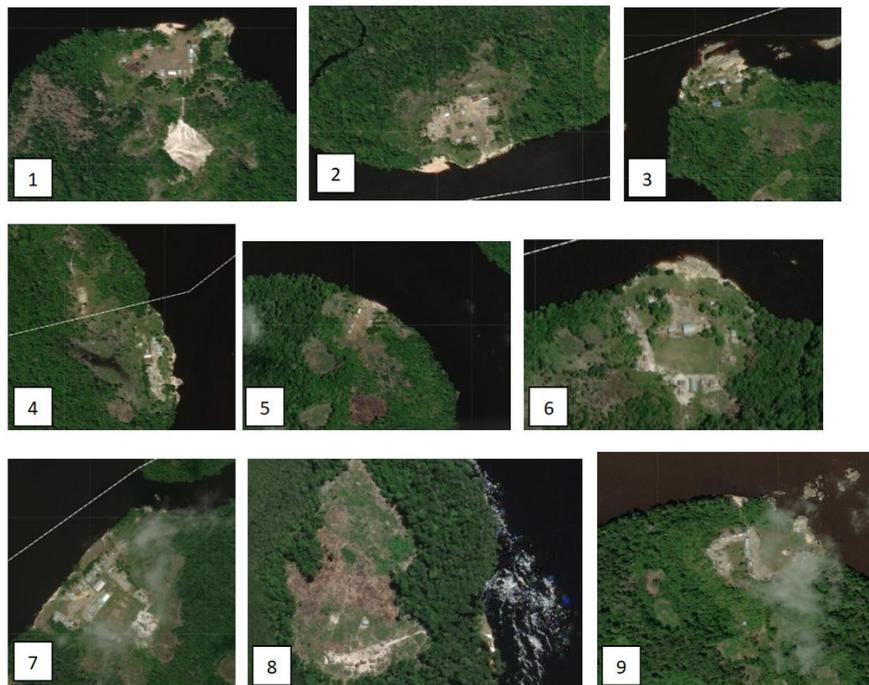


Figura. IV-17: Poblaciones enumeradas de las AIN2 y AIN6.

Elaboración propia

Se puede observar que en general el Casiquiare tiene muy poca población en sus cercanías, algo lógico debido a su ubicación (curso de agua aislado accesible solo por río o aire), presentando el AIN2 la mayor concentración de ella, pero conocer en cierta medida la ubicación de estas poblaciones es relevante y se debe tener en cuenta si en un futuro se pretende, por ejemplo, construir un puerto para embarcaciones de poco calado e inclusive para el mismo desarrollo de esas zonas pobladas al activar el comercio por medio del transporte de mercancía a través del río.

Luego de haber aplicado los criterios, se procedió, como se describe en la Fase 4 del tercer Capítulo, a la elaboración de un Modelo Digital de Elevación, DEM por sus siglas en inglés, sabiendo que básicamente es una representación visual de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar. Con la ayuda del software QGIS se creó un mosaico uniendo los nueve DEMs descargados del servidor del USGS para así abarcar toda la zona de estudio y manejar un solo archivo ráster con una resolución de 1 segundo de arco, equivalente a 30 metros aproximadamente. Aparte del DEM generado, se creó un mapa de sombras para mejorar el relieve del terreno, creando una capa adicional en el software. A continuación se presenta el producto con las AIN señaladas en color rojo, también se puede apreciar el resultado de este DEM en el Anexo 11.

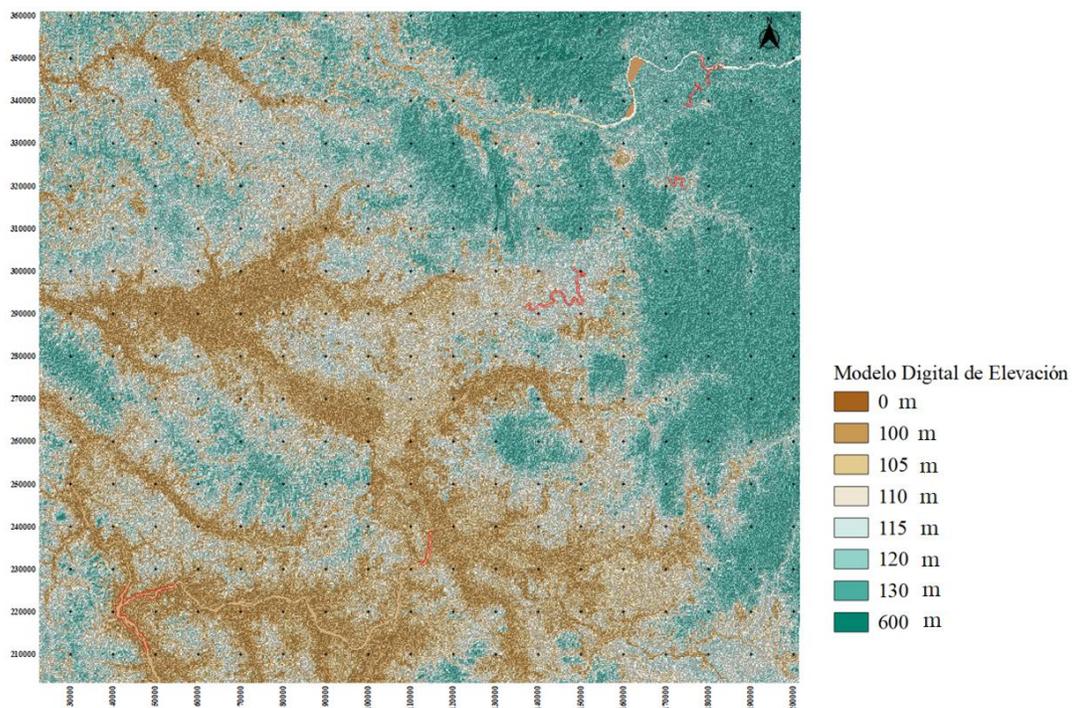


Figura. IV-18: Modelo Digital de Elevación de la zona de estudio, elevaciones en metros.

Elaboración propia

En esta figura el color marrón representa elevaciones más bajas que las del color cian, se puede observar entonces como hay mayor elevación en la parte inicial del Casiquiare (entre 115 a 120msnm) con una diferencia respecto a su desembocadura de 21 metros aproximadamente, por lo que el río fluye en una sola dirección, hacia el suroeste hasta

encontrarse con el Guainía. Aguas abajo del AIN5 el terreno parece allanarse. En general el Casiquiare y sus adyacencias se encuentran en una extensa llanura cubierta de selva, siendo la diferencia de elevación realmente escasa.

A diferencia del nivel de visualización macro de la figura anterior, se presenta a continuación una visualización micro de las AIN resaltadas en el Modelo Digital de Elevación, en donde se aprecia de manera más detallada lo comentado en el párrafo anterior, visualizaciones que se encuentran también en los Anexos 12 y 13.

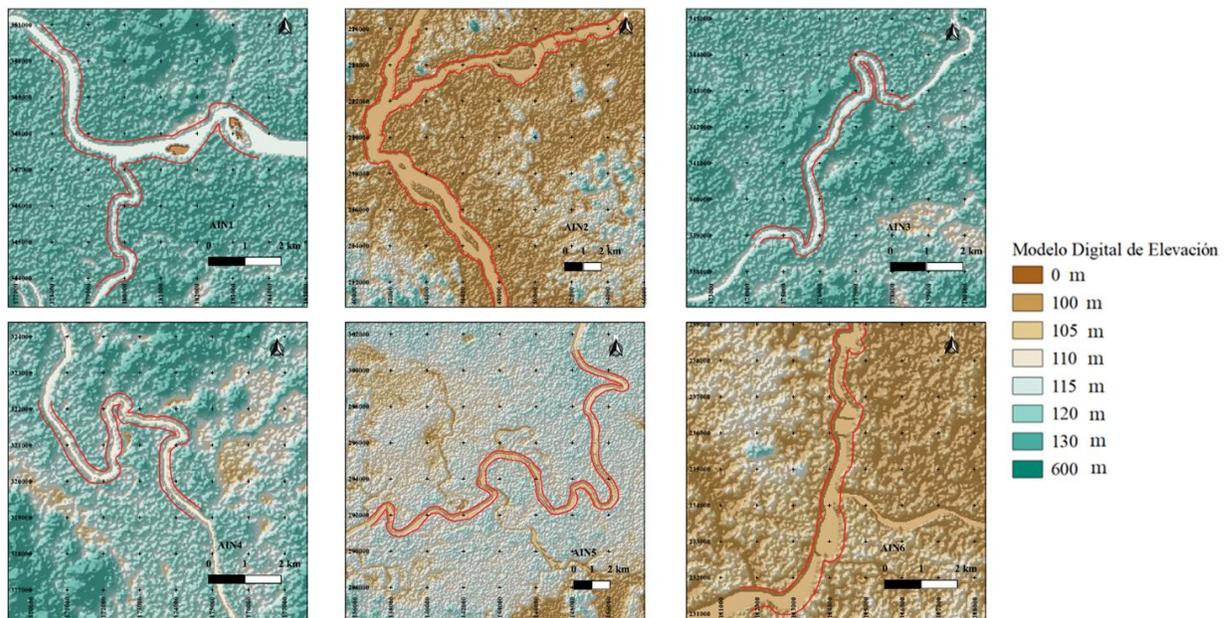


Figura. IV-19: Visión detallada de las AIN en el Modelo Digital de Elevación.

Elaboración propia

En la Fase 5 del proyecto, se unirán los criterios expuestos anteriormente que junto con el DEM formarán parte de los requerimientos técnicos para el Sistema de Información Geográfica, desarrollando de esta manera el último objetivo específico de la investigación, así como también dándole base o fundamento al concepto generado de AIN.

Algunas de las zonas críticas de las AIN posiblemente se generaron como consecuencia de la acción del hombre, ya que para poder existir poblaciones en estas zonas tuvo que

haber eliminación de la vegetación, haciendo que ésta no pueda ejercer sus diversas funciones de filtro y control en la dinámica del río.

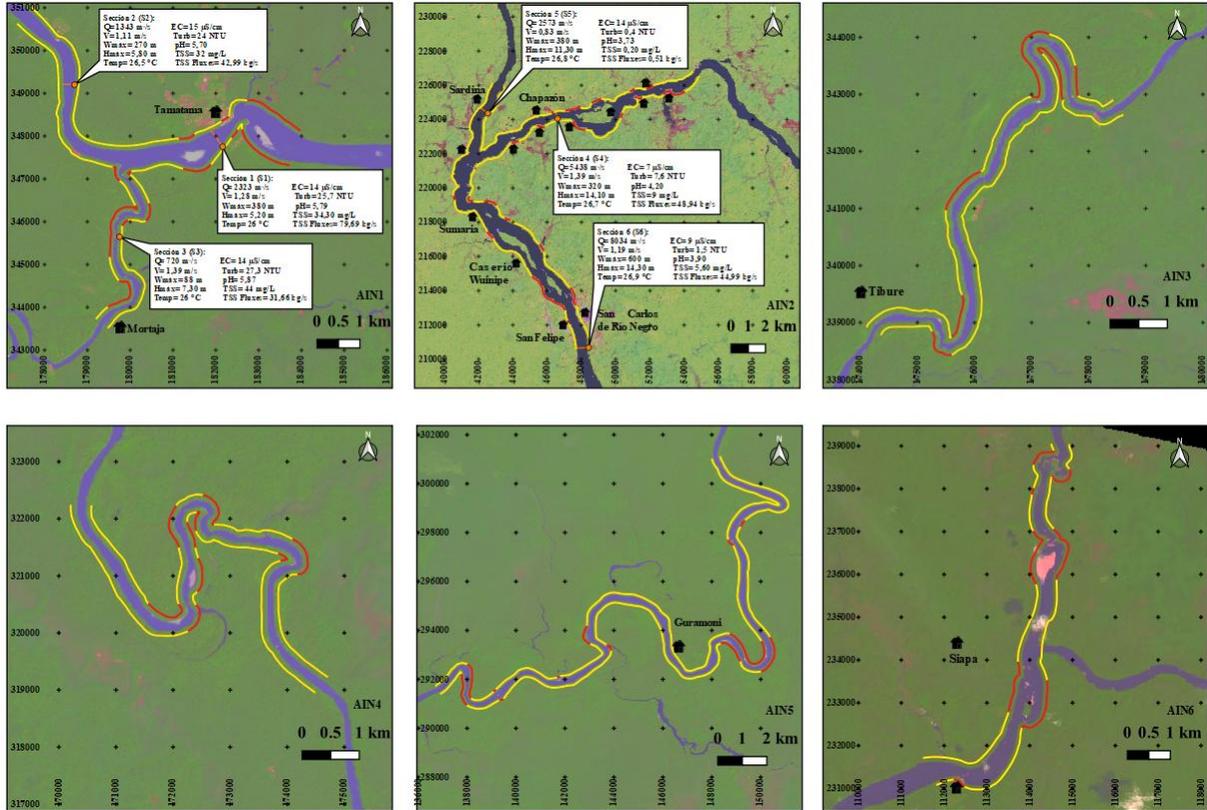


Figura. IV-20: Integración de los criterios.

Elaboración propia

La información presentada en la Figura IV-20, la cual se puede observar también en el Anexo 10, engloba los datos para el diseñador del canal de navegación. Estos datos representan un Sistema de Información Geográfica que integra capas referentes a las imágenes satelitales usadas y a los criterios establecidos en la investigación (geomorfológico, hidrosedimentario y poblacional). Es una base de datos versátil ya que las capas generadas pueden ser habilitadas o deshabilitadas según lo requiera el diseñador del canal de navegación, permitiéndole de esta manera trabajar directamente sobre la información suministrada.

CONCLUSIONES

- Las Áreas de Interés Navegable (AIN) son celdas de información que sintetizan los datos necesarios para el diseño y desarrollo de un canal de navegación fluvial en un Sistema de Información Geográfica (GIS). Estos datos corresponden a los criterios geomorfológico, hidrosedimentario y poblacional, tomando un tramo de río como su zona de aplicación y siendo estos tramos, áreas singulares que ameritan especial atención, tales como meandros irregulares o compuestos, curvas cerradas consecutivas, tramos con gran presencia de escollos en la superficie y el nacimiento y desembocadura del río.
- El uso de la telemetría satelital es de gran importancia ya que permitió ampliar y mejorar el conocimiento del río Casiquiare. Al ser una tecnología de rápido crecimiento, es posible anticipar que el aprovechamiento en el tiempo será mayor y por consiguiente los detalles de la zona de estudio se actualizarán de forma continua.
- La región en donde se encuentra el río Casiquiare, como bien lo expresa la literatura y como se puede observar en el Modelo Digital de Elevación (DEM) generado, corresponde a un tipo de terreno llano cubierto con vegetación densa y bosques tropicales con poca diferencia de elevación entre su nacimiento y su desembocadura. Evidentemente con menor elevación en la confluencia con el Guainía, lo cual ratifica que el río siempre fluye en la misma dirección.
- Los requerimientos técnicos para ensamblar el GIS se encuentran conformados por la integración de los criterios aplicados y por el DEM generado, constituyendo una información de gran importancia para el diseñador del canal de navegación, permitiéndole trabajar directamente sobre esta base.
- El río Casiquiare, en lo que respecta a su geomorfología, es un río sinuoso que presenta también a lo largo de su recorrido bastantes meandros, algunos escollos, islas y curvas muy cerradas, pero a su vez se podría decir que es un curso de agua estable que presenta en promedio (en las AIN seleccionadas) un 25% aproximadamente de zonas dinámicas del total de la longitud de cada AIN.

- A lo largo de su trayecto, el Casiquiare sufre variaciones significativas entre la bifurcación y la desembocadura en lo que respecta el criterio hidrosedimentario. Dentro de estas variaciones destacan: el aumento del ancho del cauce de 88m a 320m (casi 4 veces más), el aumento drástico del caudal de 720 m³/s a 5438 m³/s (casi 8 veces más) y el cambio de color del agua pasando de “aguas claras” a “aguas oscuras” debido a la acidificación de ésta y a la disminución considerable de la concentración de sólidos suspendidos totales TSS (casi 5 veces más baja).
- El río Casiquiare presenta muy pocas zonas pobladas tanto en sus riberas como en sus adyacencias, no solo en las AIN expuestas sino en todo el trayecto del río. La AIN2 es la que mayor densidad de población presenta, esto probablemente a la cercanía con el territorio colombiano.
- Algunas consideraciones a tener en cuenta para el desarrollo del eje fluvial Orinoco-Casiquiare-Negro-Amazonas son:
 - Solventar las interrupciones en la navegación por parte de los raudales de Atures y Maipures en el río Orinoco y los raudales situados alrededor del poblado de Sao Gabriel do Cachoeira, en el río Negro.
 - En cuanto al Casiquiare, realizar obras para estabilizar las márgenes, la rectificación de curvas cerradas y la limpieza de escollos en las AIN, teniendo en cuenta la seguridad y el posible daño ambiental.
- El brazo Casiquiare representa una singularidad hidrológica, por ser un curso natural que comunica dos ríos de dos grandes cuencas hidrográficas (Orinoco y Amazonas) vecinas caracterizadas por diferentes condiciones geomorfológicas y físico-químicas, lo cual lo hace único en el mundo teniendo en cuenta además la magnitud de los flujos que transfiere desde el río Orinoco y la distancia entre las desembocaduras de los ríos Orinoco y Amazonas.
- La importancia de los recursos naturales ubicados en la cuenca del Orinoco, así como la comunicación natural entre ambas cuencas por parte del Casiquiare, contribuyen a desarrollar un mercado atractivo para otros países, haciendo del Casiquiare un canal de navegación idóneo para el transporte de mercancía.

RECOMENDACIONES

- Efectuar mediciones de campo, generando con ellas perfiles batimétricos en diferentes secciones de las AIN3, AIN4, AIN5 y AIN6. De esta manera se aplica el criterio hidrosedimentario en las AIN en donde no se pudo desarrollar. Igualmente se pueden realizar nuevas mediciones de campo en las AIN1 y AIN2 con tecnología actual, ya que las que se tienen son del año 2000, pudiendo así observar posibles cambios en las secciones expuestas y de esta manera contar con una base de datos actualizada, respecto al criterio hidrosedimentario, para todas las AIN.
- Procurar llevar a cabo estas mediciones de campo en período de aguas bajas para evaluar con datos físicos si la navegación es viable en estos tiempos, ya que la literatura expresa que en período de lluvia la navegación por el Casiquiare no presenta problemas para embarcaciones de 1,2m a 1,8m de calado.
- Para futuros proyectos en el Casiquiare realizar un análisis de carga y flota para extraer de ellos la embarcación de diseño o evaluar la aplicación de nuevas tecnologías en lo referente a embarcaciones para la navegación fluvial partiendo de la propuesta que realizó el USACE en el año 1943.
- Realizar un estudio de impacto ambiental que decida cuál proyecto es el más factible dentro de los que se encuentran para la interconexión fluvial del río Orinoco y el río Negro y de ser éste el de la navegación sobre el Casiquiare habrá que tener en cuenta la limpieza y mejoramiento del lecho de este río, eliminando las rocas que obstruyen y dificultan el paso de las embarcaciones, así como la rectificación de las curvas cerradas.
- Para los raudales de Atures y Maipures en el Orinoco y los raudales del poblado de Sao Gabriel do Cachoeira, en el río Negro, evaluar la posibilidad de utilizar sistemas multimodales (carretero o ferroviario) con puertos de transferencia para así evitar impactar significativamente con el equilibrio del río.
- Se puede aprovechar en futuras investigaciones la misión satelital Sentinel, la cual lleva 6 años produciendo imágenes satelitales de la Tierra, para ampliar el número de AIN, teniendo en cuenta que una porción del río Casiquiare (entre el AIN5 y el AIN6) no fue abarcado por las imágenes descargadas con el satélite Landsat por la gran cantidad de nubes sobre el río.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alain Laraque, Jose Luis Lopez, Santiago Yopez and Paul Georgescu. (2019). Water and Sediment Budget of Casiquiare Channel Linking Orinoco and Amazon Catchments, Venezuela. Water, 18 p.
- CAF Banco de Desarrollo de América Latina. (1998). Los ríos nos unen. Integración fluvial suramericana. CAF. Colombia.
- Georgescu, P. (2013). Ríos de integración. El camino fluvial de América Latina. CAF Banco de Desarrollo de América Latina.
- Hurtado, J. (2000). Metodología de la Investigación Holística. Tercera edición. Sypal.
- Jaimurzina, A. y Wilmsmeier, G. (2017). La movilidad fluvial en América del Sur. CEPAL-Serie Recursos Naturales e Infraestructura N°188. Naciones Unidas, Santiago.
- Méndez, A y Roo, H. (2007). Los papeles del Dr. Rafael De León. Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat. Venezuela.
- Mendoza, C. J. (2013). Diseño de canal de navegación fluvial, aplicando modelos matemáticos hidrodinámicos, caso de estudio: río Apure, tramo San Fernando-Boca de Apure. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Mendoza, C. J. (2018). Guía de diseño de canales de navegación marítimos aplicable a Venezuela, caso estudio: canales de aproximación a puerto de buques de gran calado. Trabajo de ascenso. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Rocha, A. (1998). Introducción a la Hidráulica Fluvial. Primera edición. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil. Perú.
- Rocha, A. La morfología fluvial y su incidencia en la estabilidad de las obras viales. Instituto de la Construcción y Gerencia.
- Rodríguez, N. y otros. (2009). Software para corregir los datos inválidos en las imágenes Landsat 7. Recuperado el 16 de septiembre de 2020 de <http://www.repositorioedciencia.cu:8080/jspui/bitstream/123456789/148/1/17.07.pdf>

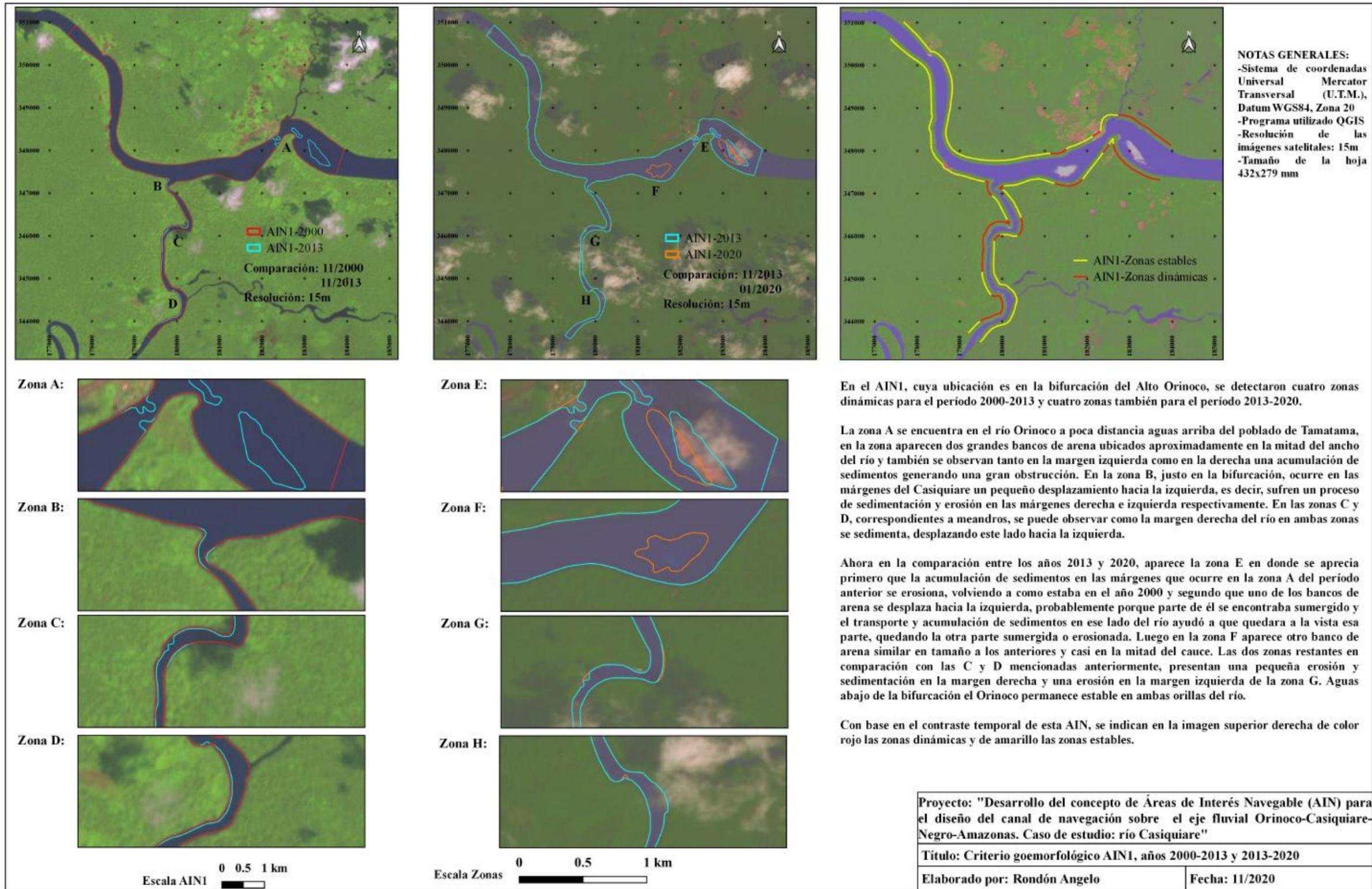
Terrazas, R. (2016). Hidrovías para el desarrollo y la integración suramericana. CAF Banco de Desarrollo de América Latina. Colombia.

U.S Army Corps of Engineers (USACE). (1943). Orinoco-Casiquiare-Negro Waterway Venezuela-Colombia-Brazil. U.S Army Corps of Engineers, Atlanta, Georgia.

Vide, J. P. (2003). Ingeniería de ríos. Ediciones UPC. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.

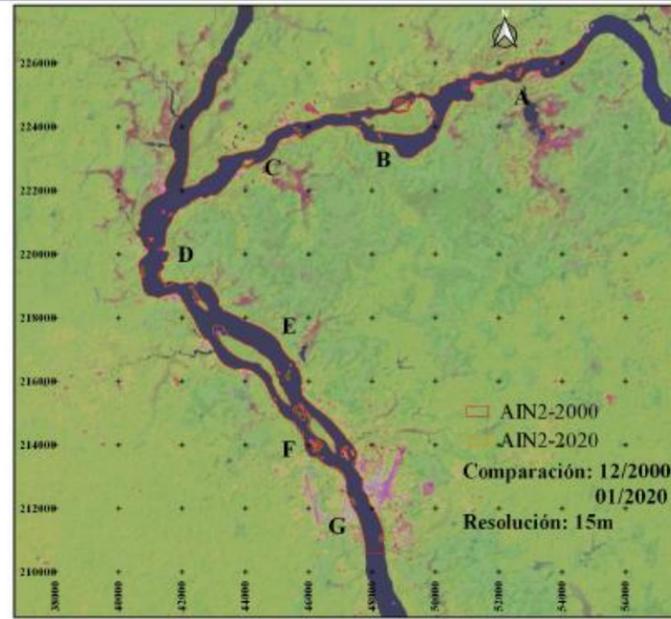
ANEXOS

Anexo 1: Criterio geomorfológico AIN1, años 2000-2013 y 2013-2020	72
Anexo 2: Criterio geomorfológico AIN2, años 2000-2020.....	73
Anexo 3: Criterio geomorfológico AIN3, años 2000-2020.....	74
Anexo 4: Criterio geomorfológico AIN4, años 2000-2013 y 2013-2020	75
Anexo 5: Criterio geomorfológico AIN5, años 2000-2013 y 2013-2020	76
Anexo 6: Criterio geomorfológico AIN6, años 2000-2020.....	77
Anexo 7: Criterio geomorfológico, zonas dinámicas y estables	78
Anexo 8: Criterio hidrosedimentario	79
Anexo 9: Criterio poblacional	80
Anexo 10: Integración de los criterios.....	81
Anexo 11: Modelo Digital de Elevación de la zona de estudio.....	82
Anexo 12: Visión detallada de los AIN en el Modelo Digital de Elevación	83
Anexo 13: Representación esquemática en 3D de las AIN en el DEM	84

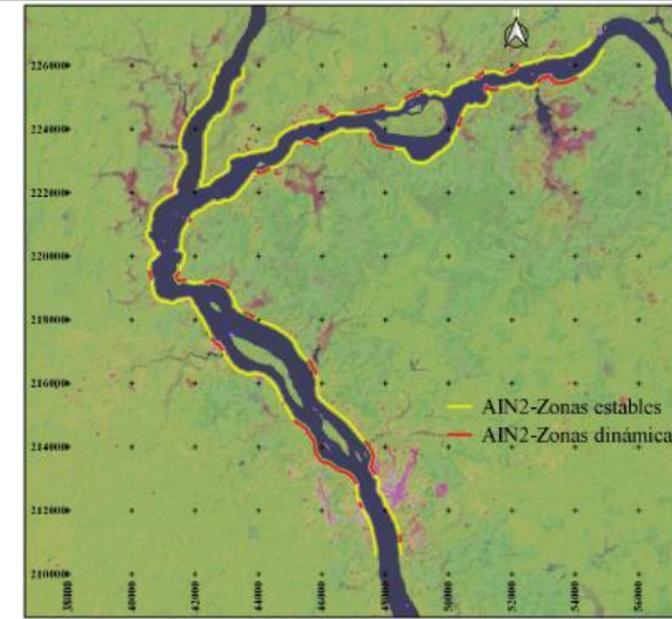


Anexo 1: Criterio geomorfológico AIN1, años 2000-2013 y 2013-2020.

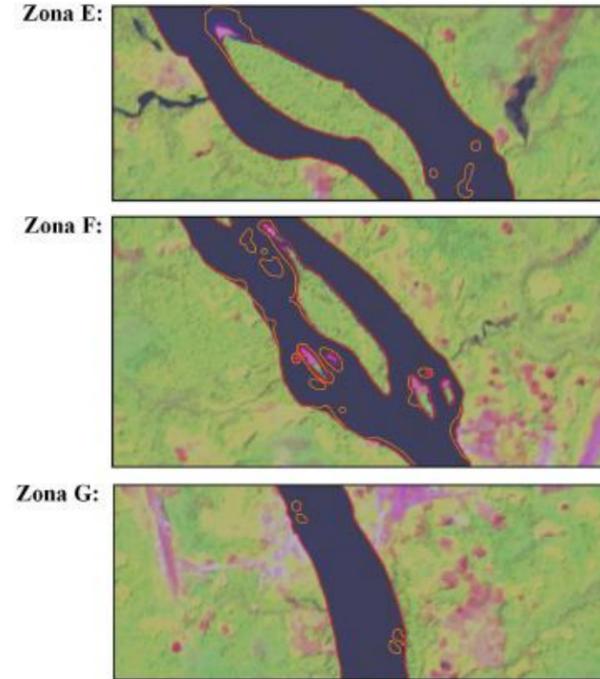
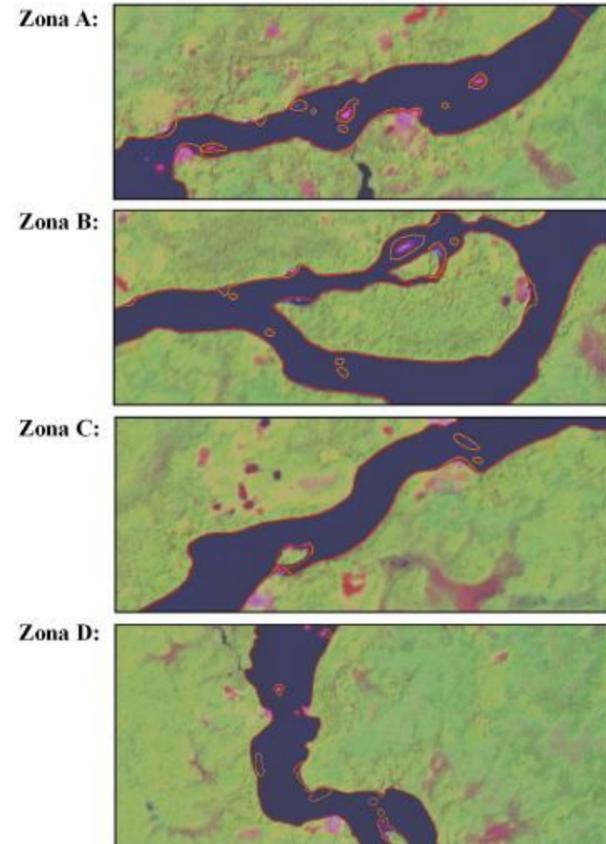
Elaboración propia



Escala AIN2 0 1 2 km



NOTAS GENERALES:
 -Sistema de coordenadas Universal Mercator Transversal (U.T.M.), Datum WGS84, Zona 19
 -Programa utilizado QGIS
 -Resolución de las imágenes satelitales: 15m
 -Tamaño de la hoja 432x279 mm



Escala Zonas A, B, C, E, F y G 0 1 2 km

Escala Zona D 0 1 2 km

En el AIN2, cuya ubicación es en la confluencia entre el río Casiquiare y el Guanía, tomando parte también del río Negro, hay siete zonas dinámicas para la comparación realizada entre el año 2000 y el 2020. Se tomó este periodo de tiempo ya que no hubo cambios apreciables para el periodo 2000-2013.

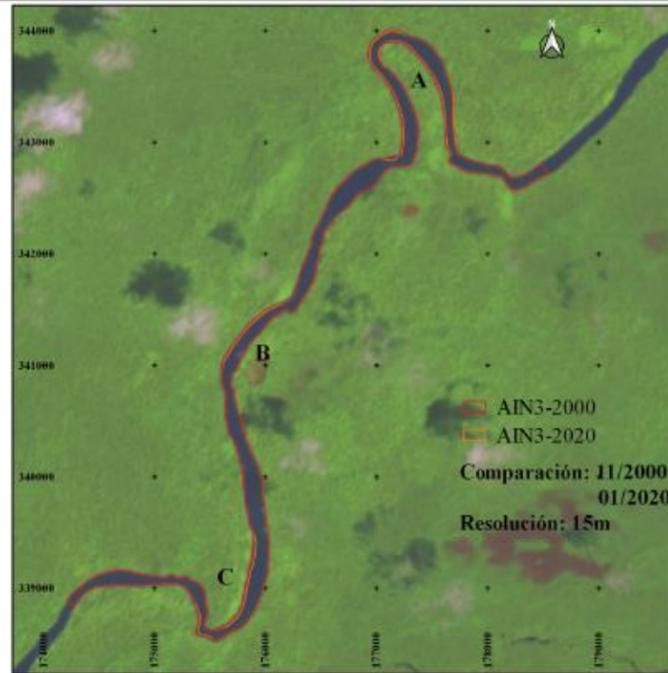
Las zonas A, B y C se ubican en el Casiquiare y las D, E, F y G en el río Negro, mientras que la porción que se toma del Guanía permanece estable. Esta AIN en particular presenta en toda su extensión numerosos escollos tales como rocas o bancos de arena que pueden interrumpir la navegación, aparte de las grandes islas que hay tanto en el Casiquiare como en el río Negro. Para el buen funcionamiento de un posible canal de navegación habría que realizar algunas voladuras de estos escollos e inclusive el dragado de sedimentos en algunas de las zonas. En esta AIN no se observa erosión alguna, más bien en todas las zonas a excepción de las E y G hay sedimentación en ambas márgenes del río. Se puede observar también en todas las zonas que aparecen nuevos obstáculos o peligros para la navegación con las rocas o bancos de sedimentos que afloran en la superficie, aparte de la ampliación de los que ya se encontraban; las islas por su parte representan en el año 2020 mayor superficie en algunas partes de ellas que las visualizadas en el 2000.

Con base en el contraste temporal de esta AIN, se indican en la imagen superior derecha de color rojo las zonas dinámicas y de amarillo las zonas estables.

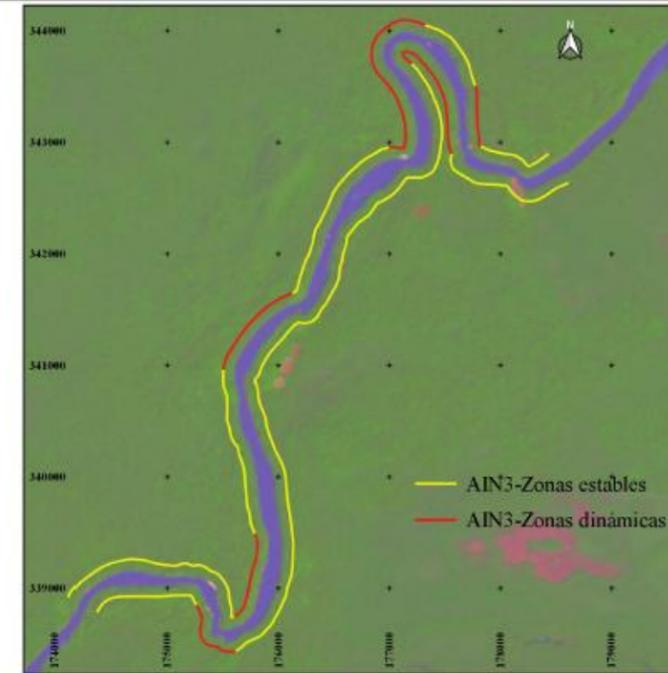
Proyecto: "Desarrollo del concepto de Áreas de Interés Navegable (AIN) para el diseño del canal de navegación sobre el eje fluvial Orinoco-Casiquiare-Negro-Amazonas. Caso de estudio: río Casiquiare"	
Título: Criterio geomorfológico AIN2, años 2000-2020	
Elaborado por: Rondón Angelo	Fecha: 11/2020

Anexo 2: Criterio geomorfológico AIN2, años 2000-2020.

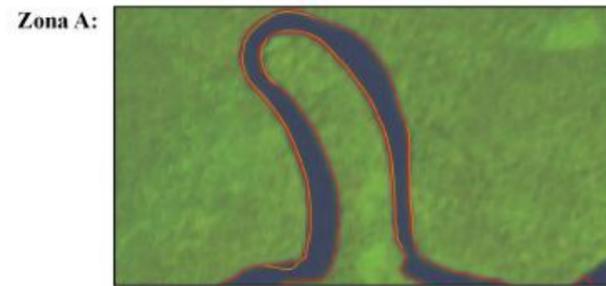
Elaboración propia



Escala AIN2 0 0.5 1 km



NOTAS GENERALES:
 -Sistema de coordenadas Universal Mercator Transversal (U.T.M.), Datum WGS84, Zona 20
 -Programa utilizado QGIS
 -Resolución de las imágenes satelitales: 15m
 -Tamaño de la hoja 432x279 mm



Escala Zonas 0 0.5 1 km

El AIN3 es la primera de las cuatro áreas que se encuentran entre la bifurcación y la confluencia. Al igual que en el AIN2, aquí no se apreciaron cambios en uno de los períodos de análisis (2013-2020), por lo tanto también se realizó el contraste entre los años 2000 y 2020.

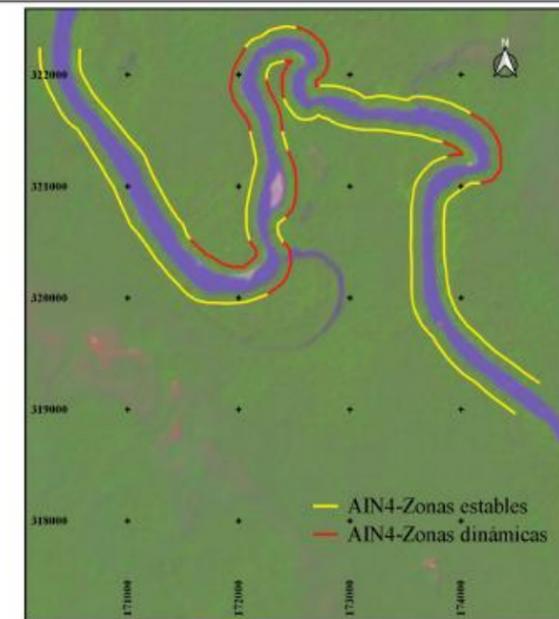
Aquí se visualizan tres zonas dinámicas, que a falta de obstáculos para la navegación se encuentran amplias zonas de sedimentación y erosión en las márgenes del río. La zona A representa un meandro muy cerrado, en el cual se observa que hay un ligero desplazamiento de éste hacia la derecha, por lo tanto hay presencia de sedimentación y erosión en cada orilla del río. En la zona B solo hay sedimentación en la margen derecha, no es muy pronunciada pero ocupa un largo trayecto. La zona C al igual que la A, es un meandro cerrado con un pequeño radio de curvatura, inconveniente que hay que tener en cuenta en el momento del diseño de canal de navegación, aquí el ancho del río se reduce, presentando sedimentación tanto en la margen derecha como en la izquierda.

Con base en el contraste temporal de esta AIN, se indican en la imagen superior derecha de color rojo las zonas dinámicas y de amarillo las zonas estables.

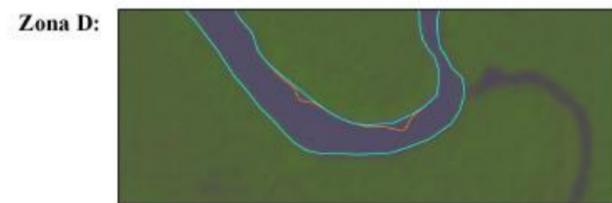
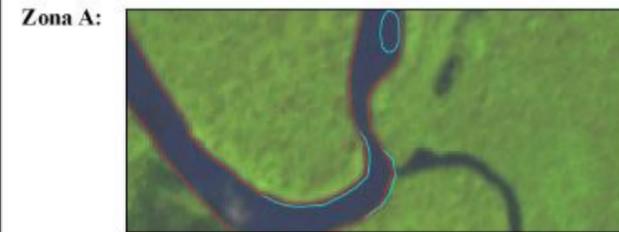
Proyecto: "Desarrollo del concepto de Áreas de Interés Navegable (AIN) para el diseño del canal de navegación sobre el eje fluvial Orinoco-Casiquiare-Negro-Amazonas. Caso de estudio: río Casiquiare"	
Título: Criterio geomorfológico AIN3, años 2000-2020	
Elaborado por: Rondón Angelo	Fecha: 11/2020

Anexo 3: Criterio geomorfológico AIN3, años 2000-2020.

Elaboración propia



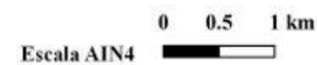
NOTAS GENERALES:
 -Sistema de coordenadas Universal Mercator Transversal (U.T.M.), Datum WGS84, Zona 20
 -Programa utilizado QGIS
 -Resolución de las imágenes satelitales: 15m
 -Tamaño de la hoja 432x279 mm



El AIN4 es la segunda de las cuatro que se encuentran entre la boca y la desembocadura del río Casiquiare, ésta retoma el análisis de los periodos 2000-2013 y 2013-2020 y se pueden observar tres zonas dinámicas para cada uno de ellos.

Esta AIN presenta fuertes meandros irregulares con radios de curvatura pequeños, lo cual es un serio inconveniente para la navegación ya que la eslora de la embarcación que transite no debe de ser muy grande. La zona A es el primer meandro presente en esta AIN y en ella se puede observar un comportamiento característico de estas curvas, se trata de una tendencia a la sedimentación de la parte interna y tendencia a la erosión en la parte externa; también se aprecia el afloramiento de un banco de arena que ocupa parte importante del ancho del río. En esta zona, antes del primer período de estudio, el meandro evolucionó hasta su punto final el cual fue el estrangulamiento, se observa claramente la formación de un atajo y el abandono del lóbulo. En la zona B el meandro casi en su totalidad se desplaza hacia la derecha, es decir, hay sedimentación y erosión en ambas márgenes del río. En la zona C, al igual que la A, parte de la curva se mueve hacia la derecha, con sedimentación en el lado interno y erosión en el externo. En la comparación 2013-2020 aparece la zona D en donde hay presencia de sedimentación en la margen izquierda. Continuando con este mismo periodo de tiempo, se encuentran las zonas E y F, en la primera el banco de arena que afloró en el periodo pasado expande su superficie ocupando aún más espacio y en la segunda, la parte final del lóbulo se desplaza más hacia la derecha en comparación con la zona C.

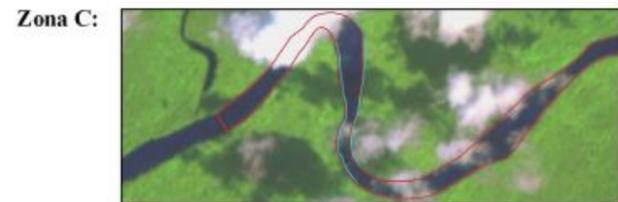
Con base en el contraste temporal de esta AIN, se indican en la imagen superior derecha de color rojo las zonas dinámicas y de amarillo las zonas estables.



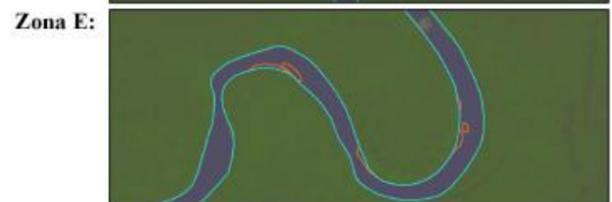
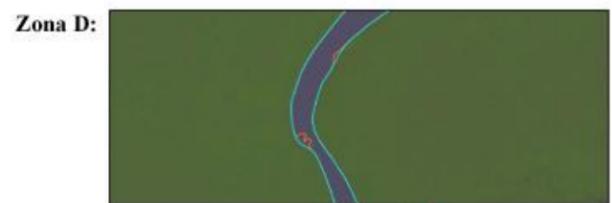
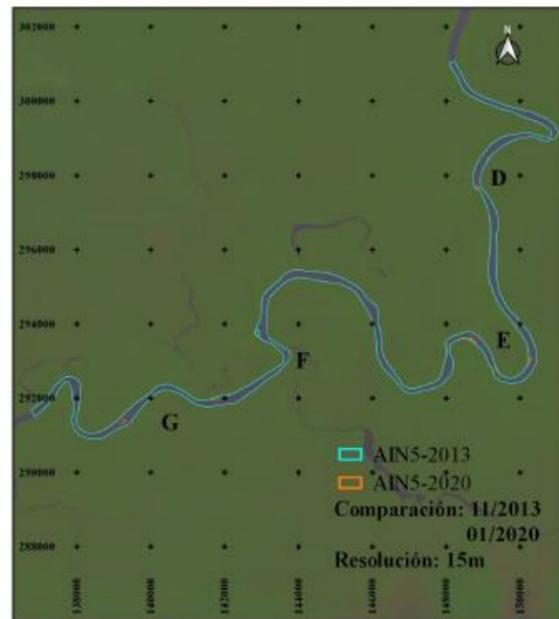
Proyecto: "Desarrollo del concepto de Áreas de Interés Navegable (AIN) para el diseño del canal de navegación sobre el eje fluvial Orinoco-Casiquiare-Negro-Amazonas. Caso de estudio: río Casiquiare"	
Título: Criterio geomorfológico AIN4, años 2000-2013 y 2013-2020	
Elaborado por: Rondón Angelo	Fecha: 11/2020

Anexo 4: Criterio geomorfológico AIN4, años 2000-2013 y 2013-2020.

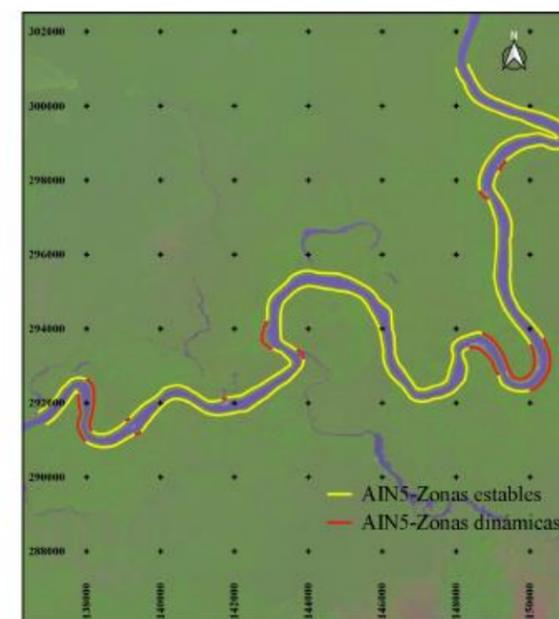
Elaboración propia



Escala AIN5 0 1 2 km



Escala Zonas 0 0.5 1 km



NOTAS GENERALES:
 -Sistema de coordenadas Universal Mercator Transversal (U.T.M.), Datum WGS84, Zona 20
 -Programa utilizado QGIS
 -Resolución de las imágenes satelitales: 15m
 -Tamaño de la hoja 432x279 mm

El AIN5 es un área con meandros irregulares, presenta tres zonas dinámicas para el periodo de estudio 2000-2013 y cuatro para el periodo 2013-2020.

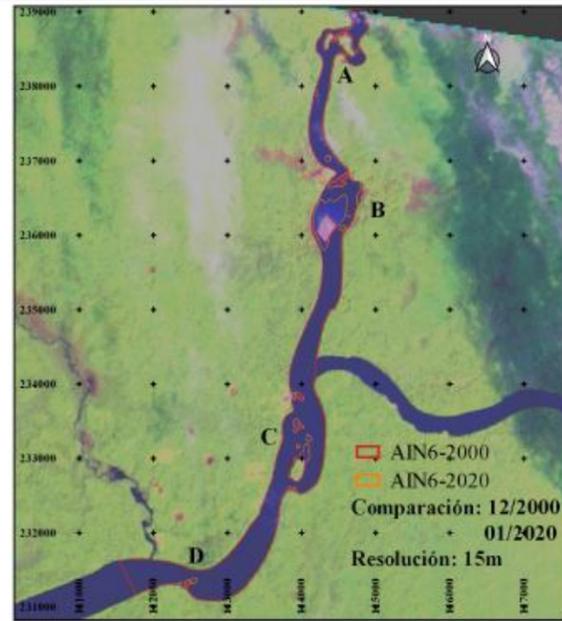
Para el primer período, la imagen satelital descargada del año 2000 a pesar de tener poco porcentaje de nubosidad (11%), gran parte de las nubes se encuentra en esta AIN, pero sin embargo se logran observar claramente tres zonas de cambios geomorfológicos, en dos de ellas, la A y C, gran parte de sus trayectos curvos se desplazan hacia la izquierda y derecha respectivamente presentando en ambas márgenes tanto sedimentación como erosión; mientras que en la zona B solo una porción de la margen derecha se sedimenta. Se puede ver que aguas arriba de esta última zona, hace un tiempo atrás, hubo un corte natural del meandro, dejando abandonada esta porción de río en forma de herradura. En las zonas D, E y G no hay erosión alguna y salen a la vista de manera dispersa algunos escollos y parte de las márgenes sedimentadas. La zona F presenta sedimentación justo en la desembocadura de un pequeño afluente del Casiquiare, pequeño en comparación con los cuatro principales,

Con base en el contraste temporal de esta AIN, se indican en la imagen superior derecha de color rojo las zonas dinámicas y de amarillo las zonas estables.

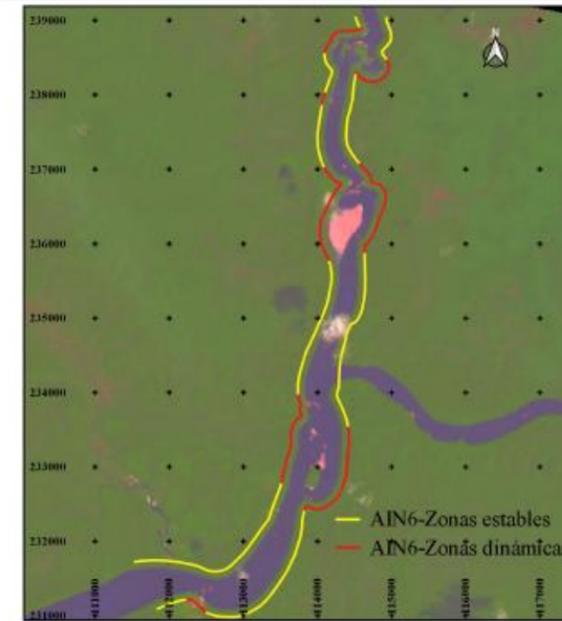
Proyecto: "Desarrollo del concepto de Áreas de Interés Navegable (AIN) para el diseño del canal de navegación sobre el eje fluvial Orinoco-Casiquiare-Negro-Amazonas. Caso de estudio: río Casiquiare"	
Título: Criterio geomorfológico AIN5, años 2000-2013 y 2013-2020	
Elaborado por: Rondón Angelo	Fecha: 11/2020

Anexo 5: Criterio geomorfológico AIN5, años 2000-2013 y 2013-2020.

Elaboración propia



Escala AIN6 0 0.5 1 km



NOTAS GENERALES:
 -Sistema de coordenadas Universal Transversal (U.T.M.), Datum WGS84, Zona 19
 -Programa utilizado QGIS
 -Resolución de las imágenes satelitales: 15m
 -Tamaño de la hoja 432x279 mm

Zona A:



Zona D:



Zona B:



Zona C:



Escala Zonas 0 0.5 1 km

El AIN6 es la última área antes de la confluencia del Casiquiare con el Guanía, en ella desemboca uno de los principales afluentes del Casiquiare, el río Siapa. De igual manera que el AIN2 no hay cambios apreciables en el período 2000-2013, por lo que el estudio se realiza para el 2000-2020.

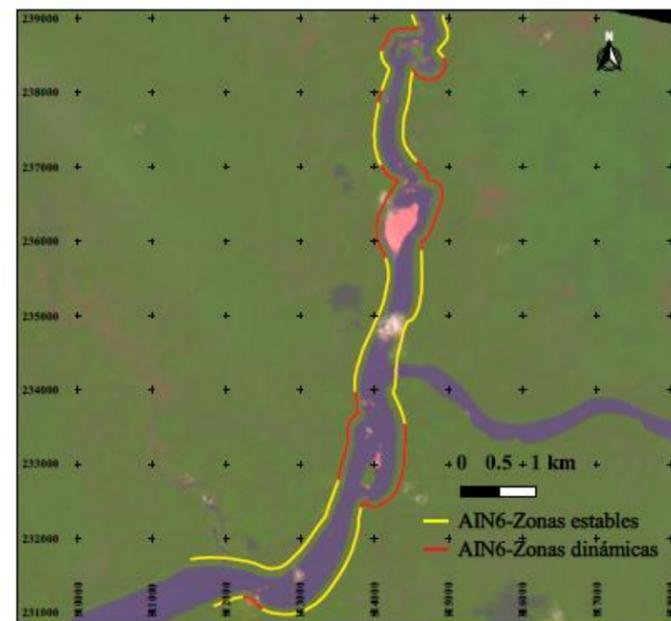
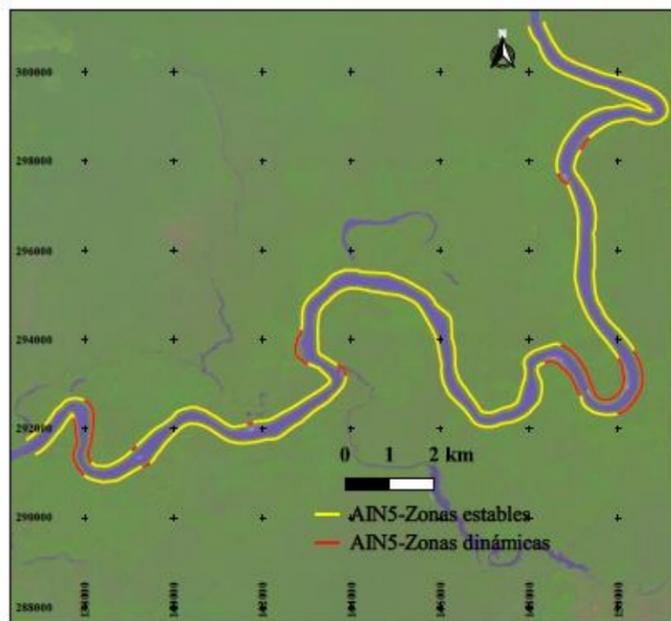
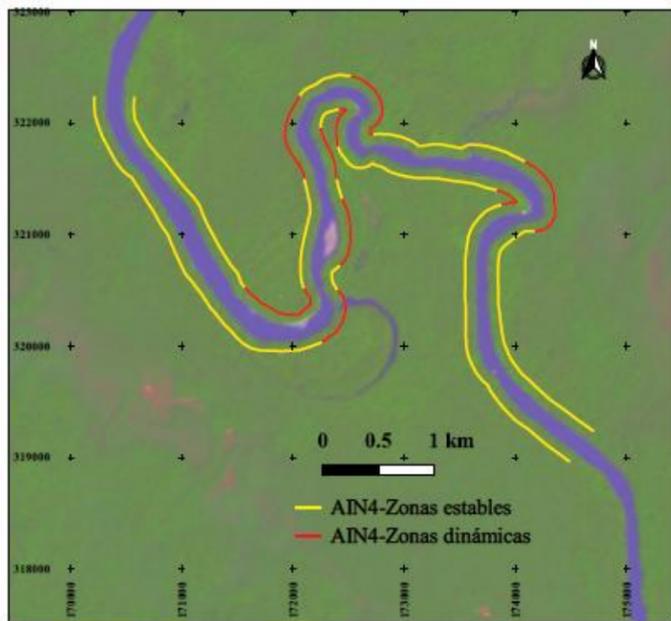
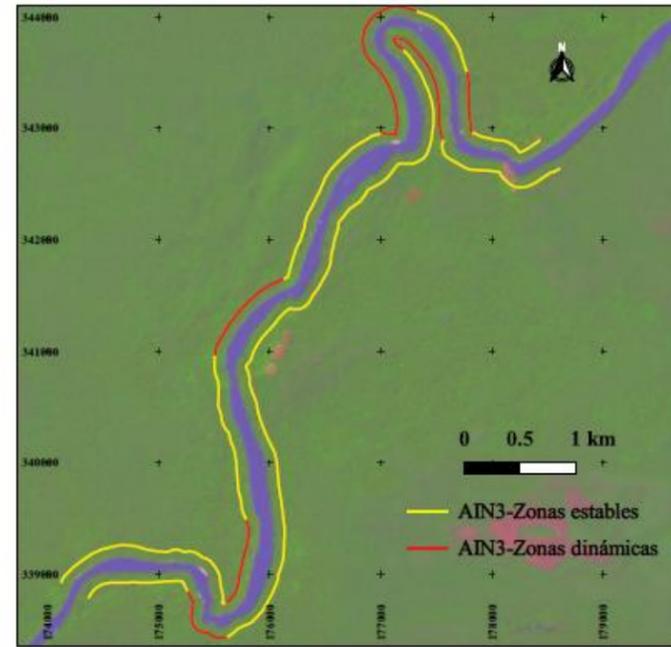
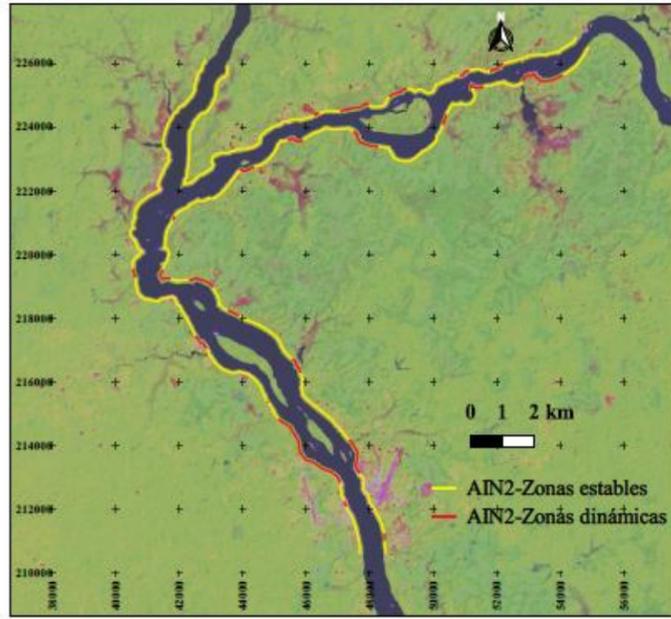
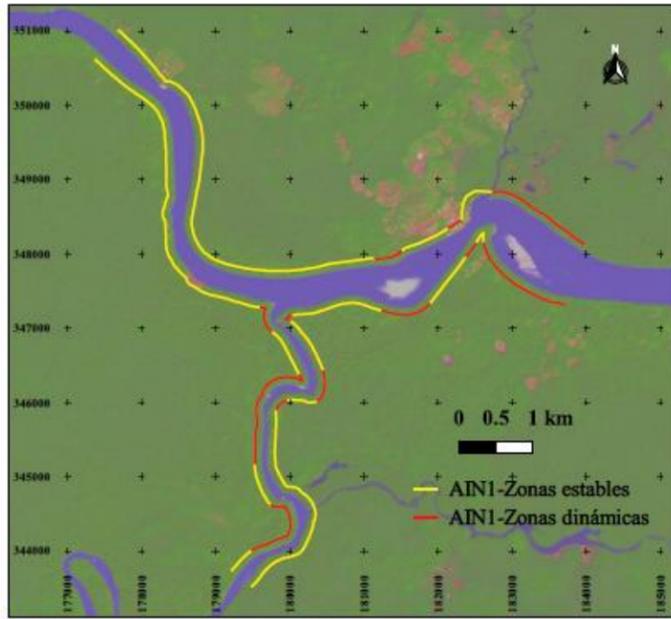
Como se puede observar, esta AIN presenta cuatro zonas dinámicas, empezando por la A, en donde aparte de la sedimentación que ocurre en ambas márgenes, hay dos islas que con el paso del tiempo se fueron sedimentando en algunas regiones abarcando casi la totalidad del ancho del río y generando un gran obstáculo para la navegación. En las zonas B, C y D, separadas las tres por un buen trayecto estable, ocurre lo mismo, en algunas partes las márgenes se sedimentan y las islas, bancos de arena y afloramientos rocosos que ya se apreciaban salen más a la vista ocupando más espacio y obstruyendo gran parte del cauce.

Con base en el contraste temporal de esta AIN, se indican en la imagen superior derecha de color rojo las zonas dinámicas y de amarillo las zonas estables.

Proyecto: "Desarrollo del concepto de Áreas de Interés Navegable (AIN) para el diseño del canal de navegación sobre el eje fluvial Orinoco-Casiquiare-Negro-Amazonas. Caso de estudio: río Casiquiare"	
Título: Criterio geomorfológico AIN6, años 2000-2020	
Elaborado por: Rondón Angelo	Fecha: 11/2020

Anexo 6: Criterio geomorfológico AIN6, años 2000-2020.

Elaboración propia



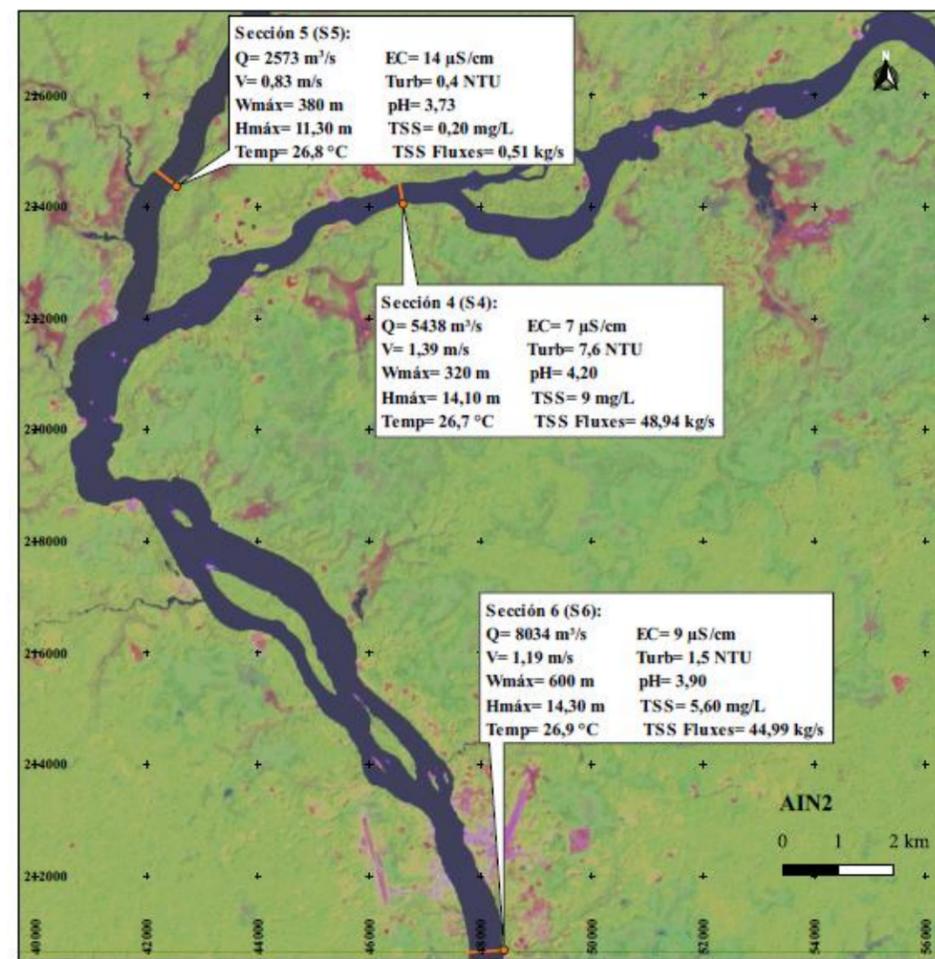
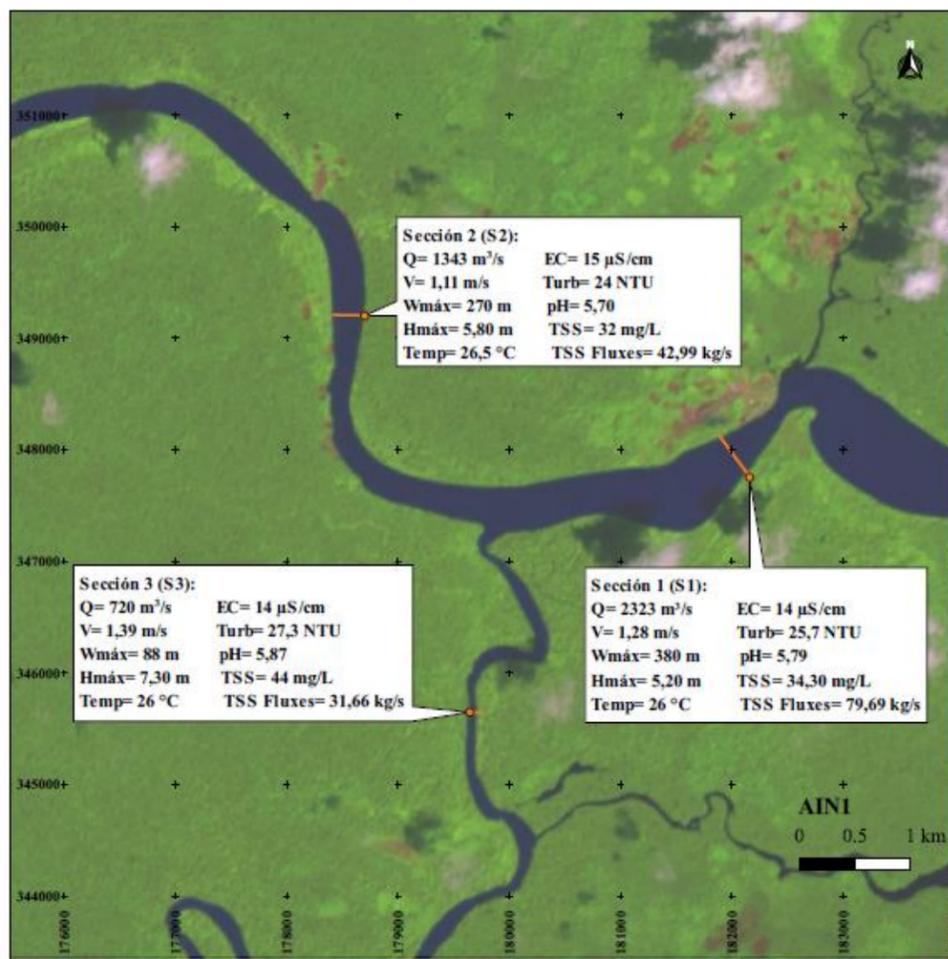
NOTAS GENERALES:
 -Sistema de coordenadas Universal Mercator Transversal (U.T.M.), Datum WGS84, Zona 19 y 20
 -Programa utilizado QGIS
 -Resolución de las imágenes satelitales: 15m
 -Tamaño de la hoja 432x279 mm

En general se puede observar que en lo referente a la geomorfología del río, el Casiquiare es bastante estable, ya que en las seis AIN presentadas, las zonas dinámicas representan un bajo porcentaje de la longitud total de cada una (25% en promedio aproximadamente) en comparación con las zonas estables, sin embargo para un buen desarrollo de la navegación en este río en futuros proyectos habrá que tener muy en cuenta estas zonas que son las que tienen tendencia a cambios geomorfológicos y en donde se tendrá que evaluar la realización de obras de estabilización de las márgenes, así como también operaciones de dragado, voladuras y remoción de las rocas, ampliación de las curvas de radios pequeños, entre otra serie de actividades necesarias.

Proyecto: "Desarrollo del concepto de Áreas de Interés Navegable (AIN) para el diseño del canal de navegación sobre el eje fluvial Orinoco-Casiquiare-Negro-Amazonas. Caso de estudio: río Casiquiare"	
Título: Criterio geomorfológico, zonas dinámicas y estables	
Elaborado por: Rondón Angelo	Fecha: 11/2020

Anexo 7: Criterio geomorfológico, zonas dinámicas y estables.

Elaboración propia



NOTAS GENERALES:
 -Sistema de coordenadas Universal Mercator Transversal (U.T.M.), Datum WGS84, Zonas 19 y 20
 -Programa utilizado QGIS
 -Resolución de las imágenes satelitales: 15m
 -Tamaño de la hoja 432x279 mm

Comparando las dos secciones del Casiquiare (S3 y S4), el caudal de la S4 es 7,5 veces mayor que la S3, debido a profundidades y anchos máximos que son mayores por más del doble, mientras que la velocidad de flujo permanece constante a lo largo del río con 1,39 m/s. Esta velocidad es mayor que en las otras cuatro secciones (S1, S2, S5 y S6), probablemente como consecuencia de la diferencia de elevación del Casiquiare y de la gran contribución de sus afluentes, los cuales ingresan un flujo total de 4718 m³/s.

Con respecto al flujo de sedimentos, estos no varían tanto en comparación con el caudal, siendo tan solo 1,5 veces más alto en la salida que en la entrada, ya que bajan considerablemente las concentraciones de TSS a la salida.

En la imagen no se observa el color del agua, pero inicialmente las aguas del Casiquiare son de color marrón claro y a medida que se avanza hasta su desembocadura, las aguas se vuelven más ácidas, es decir, más negras. El aporte de los afluentes del Casiquiare tienen un pH ácido, varios autores comentan que inclusive más que el Guanía. La acidez es el contenido de hidrógeno en el agua, por lo tanto, mientras más ácida más oscura es.

Los valores de conductividad eléctrica, turbiedad y pH disminuyeron desde la S3 hasta la S4, esto se debe a lo mencionado anteriormente, en donde los afluentes al haber drenado el bosque y llanuras pantanosas en su margen izquierda, hacen que las aguas del Casiquiare durante su viaje adquieran pH más ácidos, menor turbiedad y menor conductividad, pareciéndose cada vez más a los ríos de "aguas negras" de la cuenca del Amazonas.

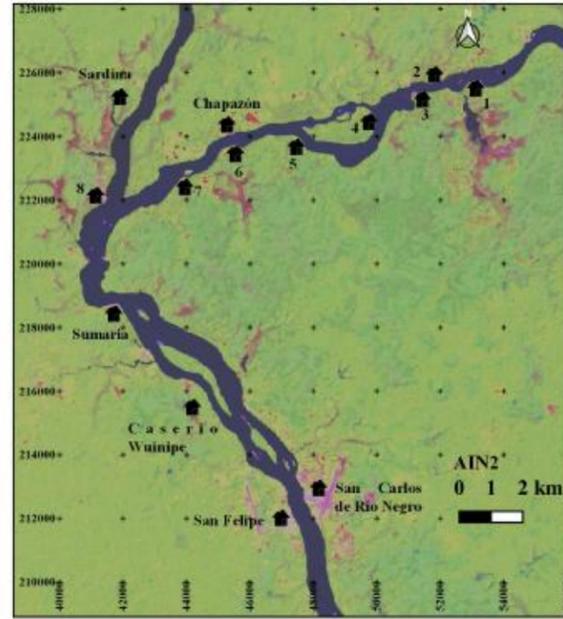
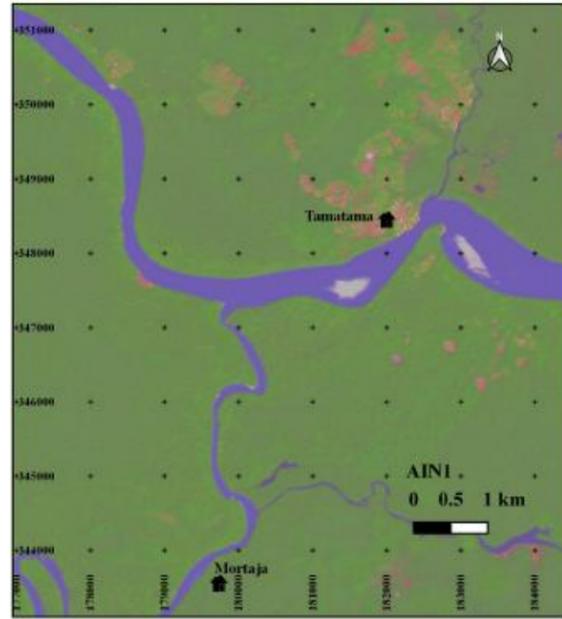
Por último, se puede apreciar que en la bifurcación el balance hídrico es casi 90% completo y el balance de flujo de sedimentos 94%, mientras que en la confluencia el balance hídrico es casi 100% completo y el balance de flujo de sedimentos 91%. Estas diferencias probablemente se deban al protocolo de medición. Dicho esto, se podría decir que la ley de conservación de la masa se respeta, tanto en la bifurcación como en la confluencia.

En donde:
 Q= descarga de flujo
 V= velocidad de flujo superficial
 Wmax= ancho máximo del canal
 Hmax= profundidad máxima
 Temp= temperatura
 EC= conductividad eléctrica
 Turb= turbidez
 TSS= concentración total de sedimento suspendido
 TSS Fluxes= flujo de sedimentos

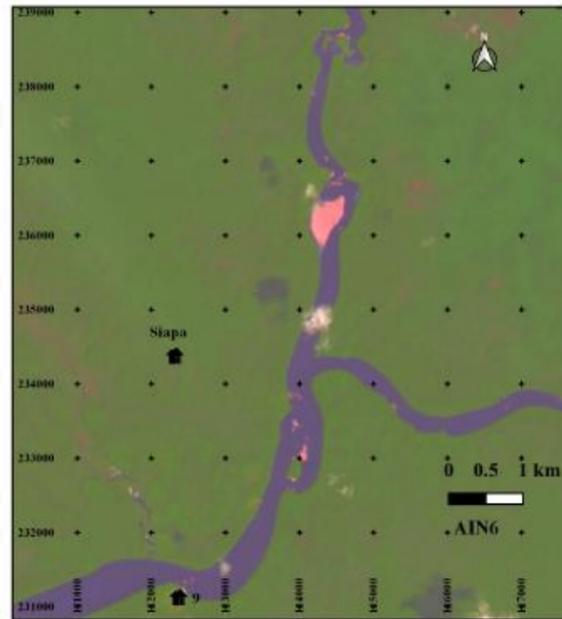
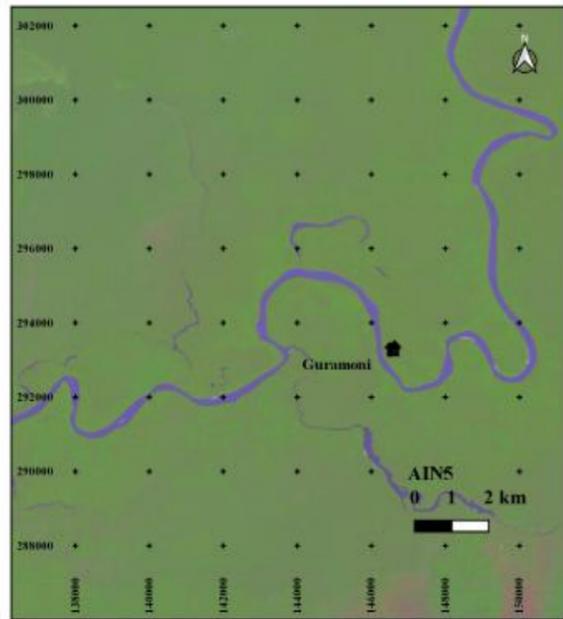
Proyecto: "Desarrollo del concepto de Áreas de Interés Navegable (AIN) para el diseño del canal de navegación sobre el eje fluvial Orinoco-Casiquiare-Negro-Amazonas. Caso de estudio: río Casiquiare"	
Título: Criterio hidrosedimentario, AIN1 y AIN2	
Elaborado por: Rondón Angelo	Fecha: 11/2020

Anexo 8: Criterio hidrosedimentario.

Elaboración propia



NOTAS GENERALES:
 -Sistema de coordenadas Universal Mercator Transversal (U.T.M.), Datum WGS84, Zonas 19 y 20
 -Programa utilizado QGIS
 -Resolución de las imágenes satelitales: 15m
 -Tamaño de la hoja 432x279 mm



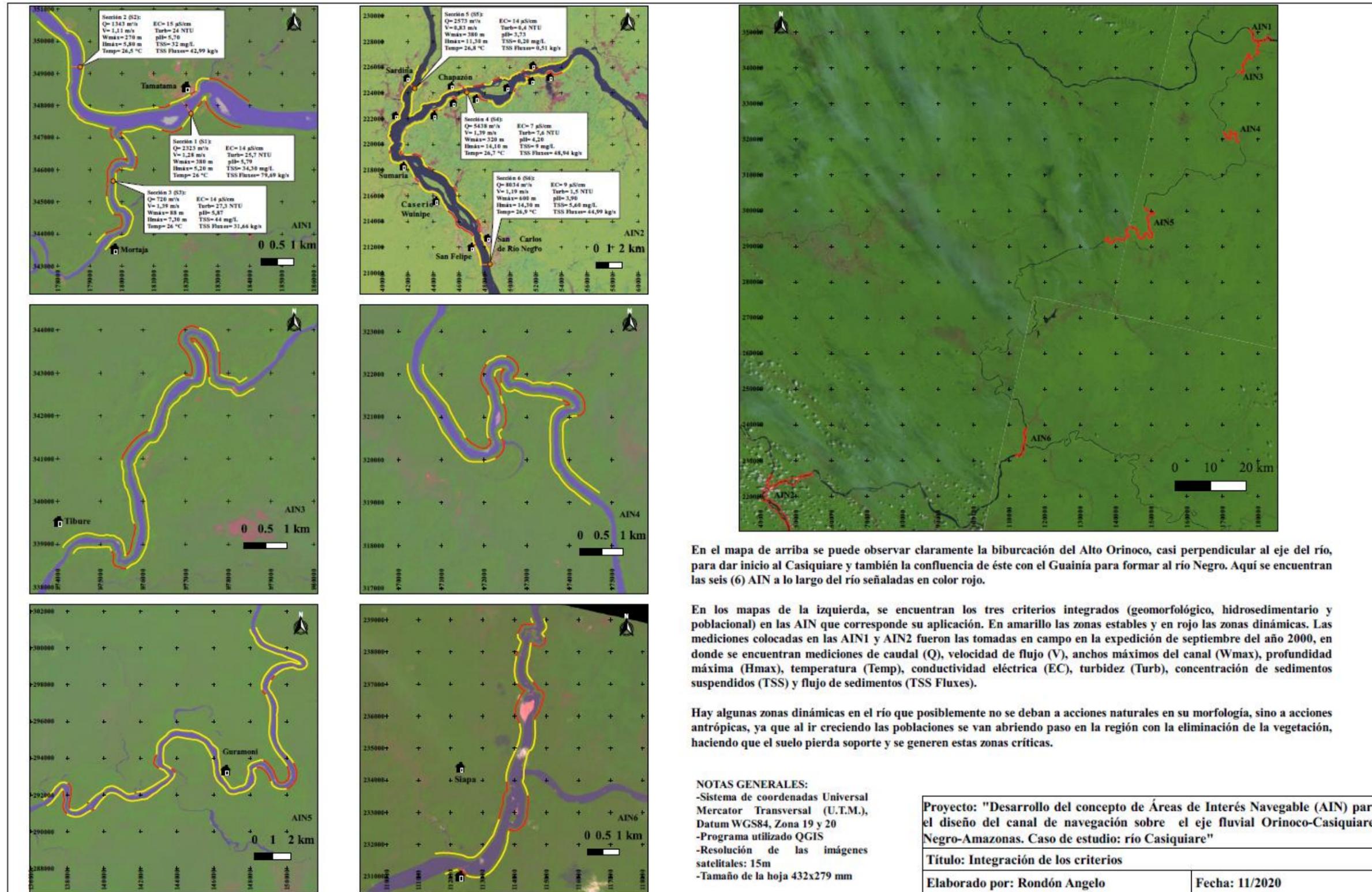
En el AIN4 no se encontraron zonas pobladas, por lo tanto no se muestra esta área en la presentación. Aquellas poblaciones que aparecen con su nombre son las que se ubicaron con la ayuda de Google Earth y las que no aparecen con nombre se lograron visualizar en la página del USGS y se les asignó un número del uno (1) al nueve (9), las primeras ocho en el AIN2 y la número nueve en el AIN6.

En general el Casiquiare tiene muy poca población en sus cercanías, algo lógico debido a su ubicación, siendo el AIN2 la que mayor concentración de zonas pobladas presenta.

Proyecto: "Desarrollo del concepto de Áreas de Interés Navegable (AIN) para el diseño del canal de navegación sobre el eje fluvial Orinoco-Casiquiare-Negro-Amazonas. Caso de estudio: río Casiquiare"	
Título: Criterio poblacional	
Elaborado por: Rondón Angelo	Fecha: 11/2020

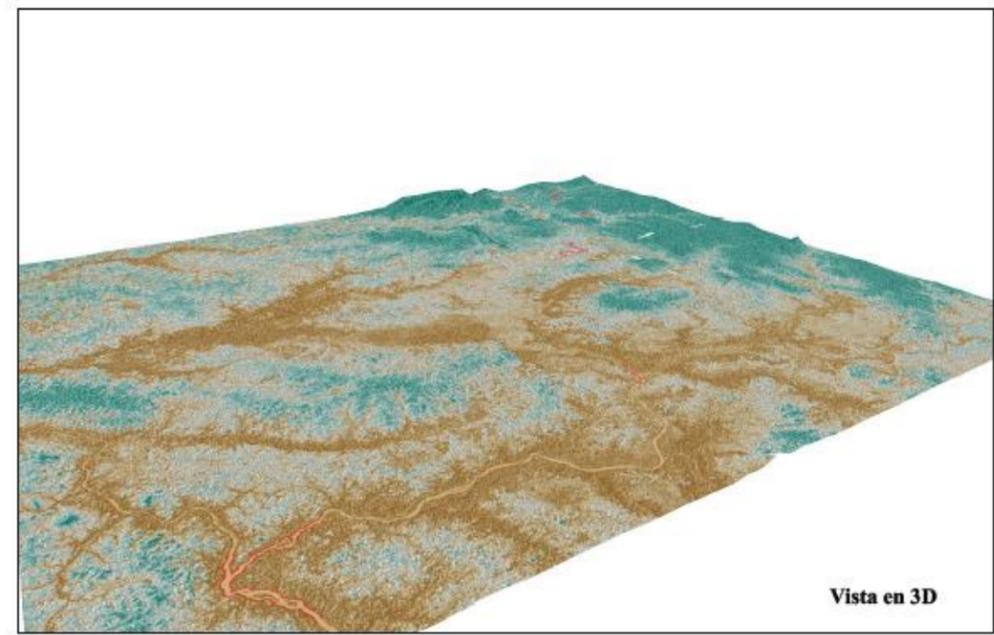
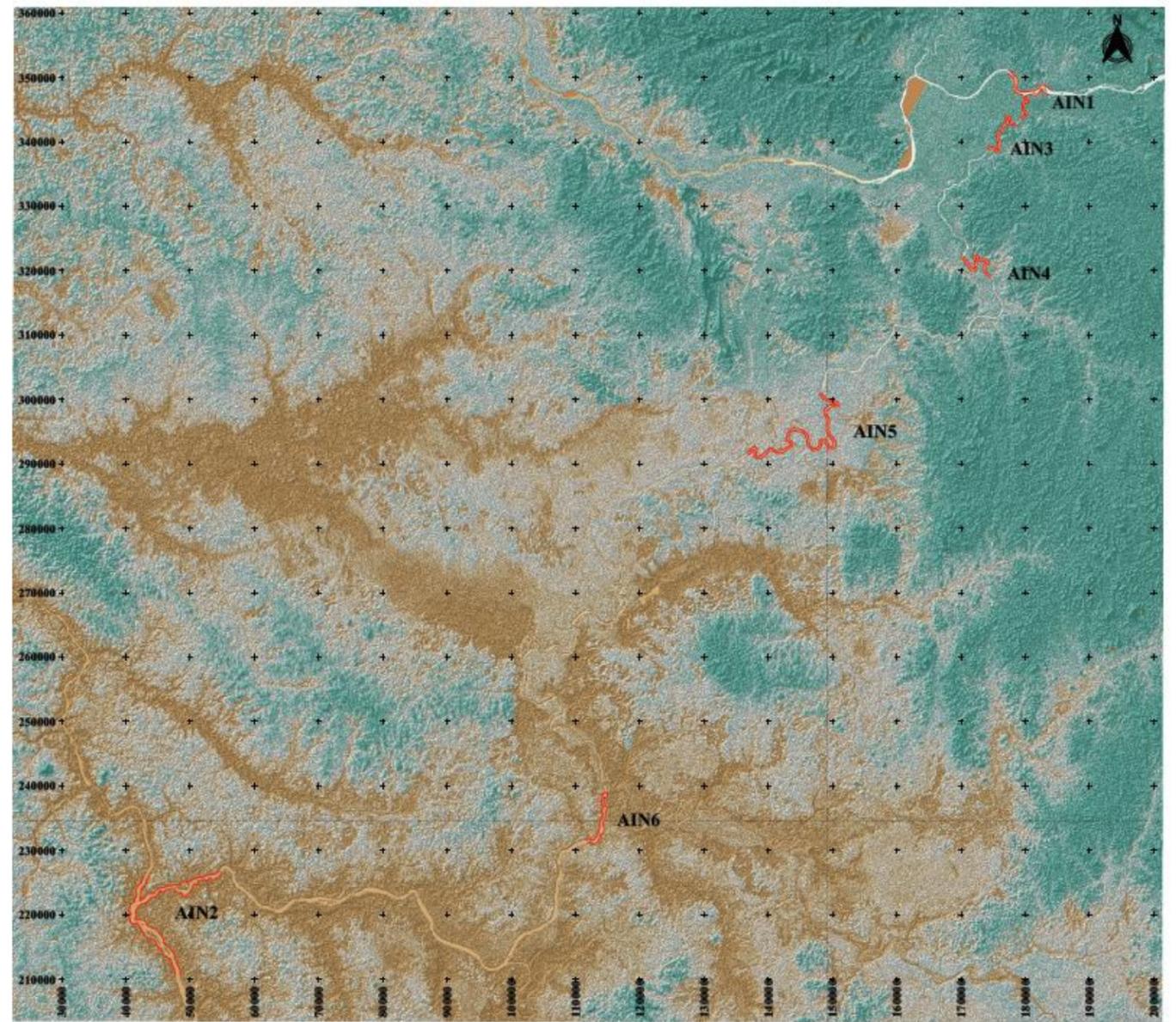
Anexo 9: Criterio poblacional.

Elaboración propia

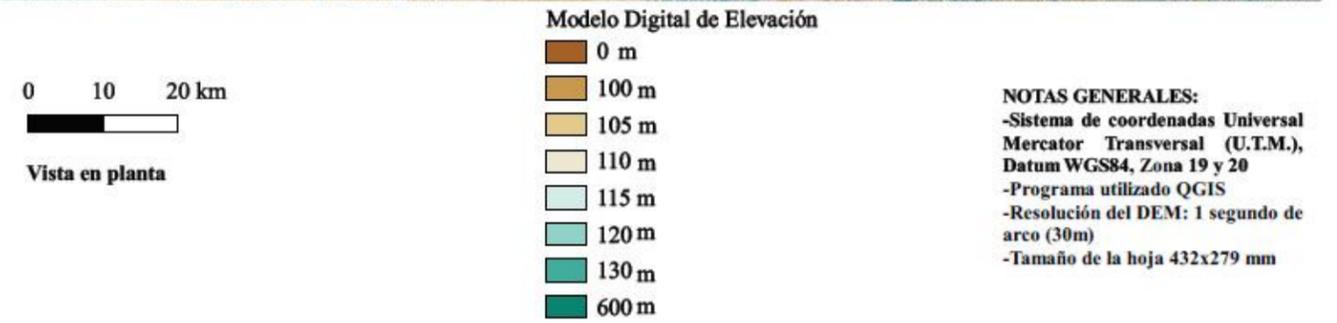


Anexo 10: Integración de los criterios.

Elaboración propia



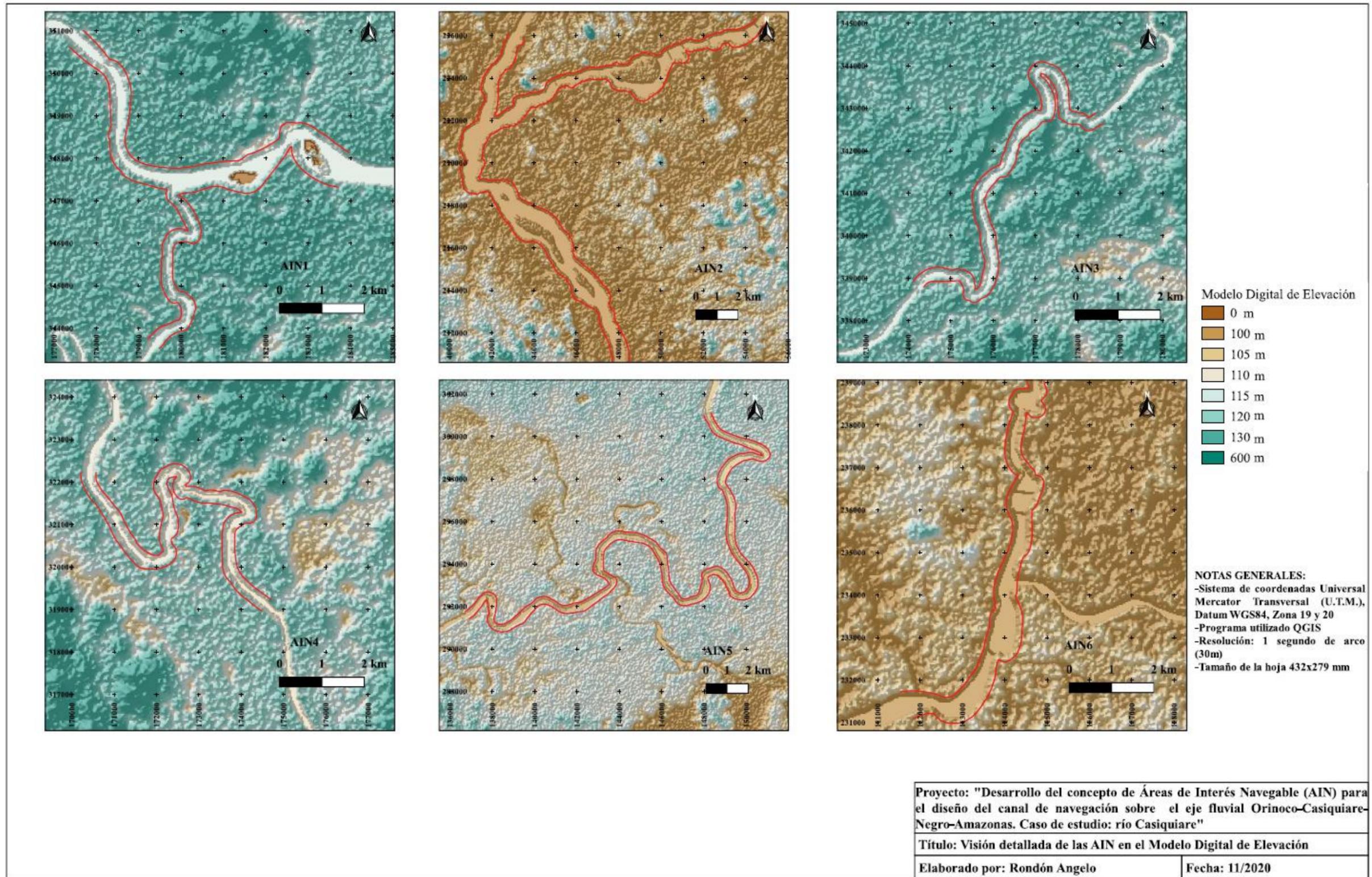
Aquí se presenta el Modelo Digital de Elevación de la zona de estudio con una paleta de colores que van desde el color marrón hasta el color cian y las AIN señaladas en color rojo. El color marrón representa elevaciones más bajas que las del color cian, se puede apreciar entonces como hay mayor elevación en la parte inicial del Casiquiare con una diferencia respecto a su desembocadura de 21 metros aproximadamente, por lo que el río fluye en una sola dirección, hacia el suroeste hasta encontrarse con el Guainía. Aguas abajo del AIN5 a lo largo del río el terreno parece allanarse hasta llegar a su desembocadura. En general el Casiquiare y sus adyacencias se encuentran en una extensa llanura cubierta de selva, siendo la diferencia de elevación realmente escasa.



Proyecto: "Desarrollo del concepto de Áreas de Interés Navegable (AIN) para el diseño del canal de navegación sobre el eje fluvial Orinoco-Casiquiare-Negro-Amazonas. Caso de estudio: río Casiquiare"	
Título: Modelo Digital de Elevación (DEM) de la zona de estudio	
Elaborado por: Rondón Angelo	Fecha: 11/2020

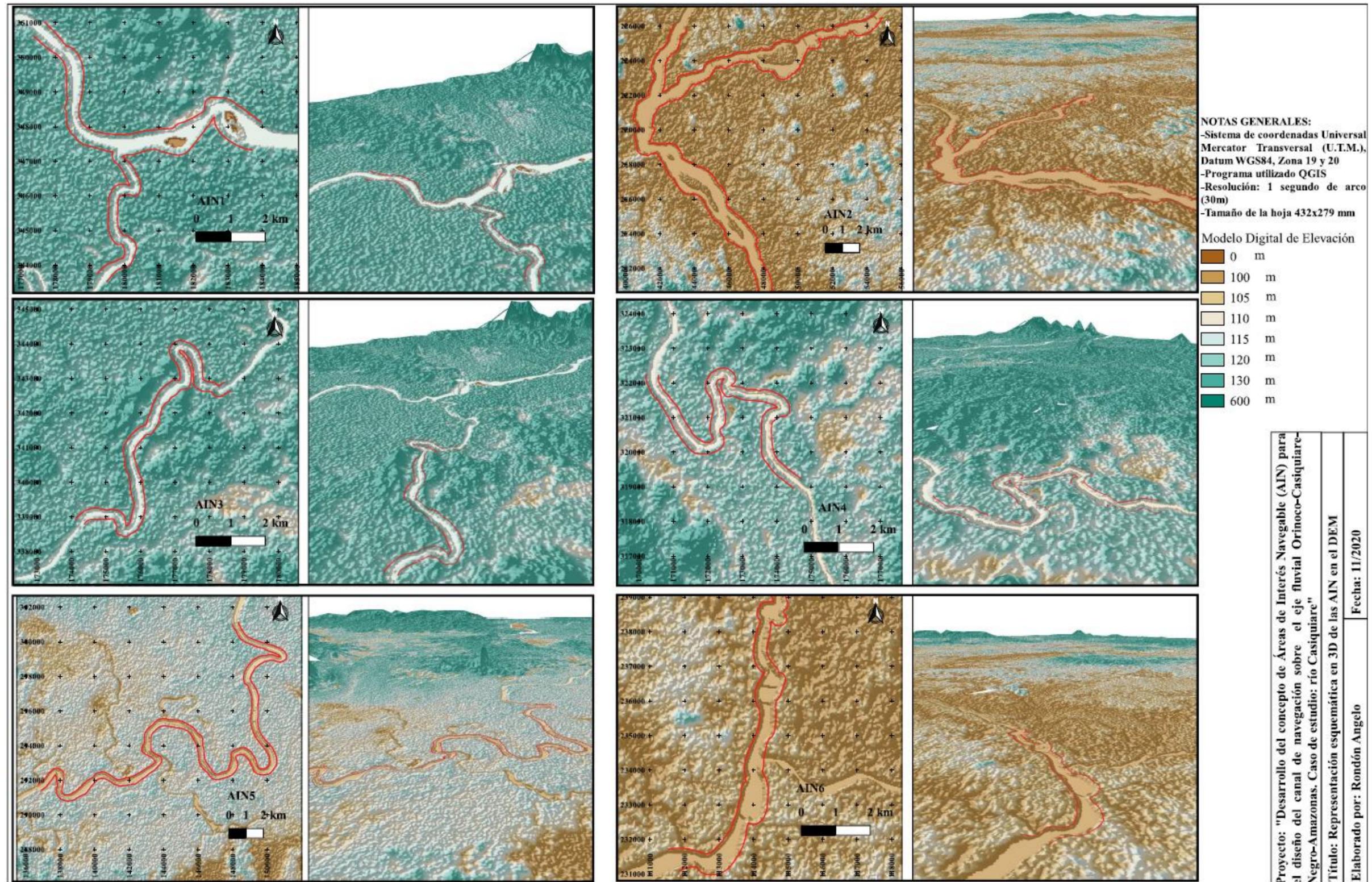
Anexo 11: Modelo Digital de Elevación de la zona de estudio.

Elaboración propia



Anexo 12: Visión detallada de las AIN en el Modelo Digital de Elevación.

Elaboración propia



Anexo 13: Representación esquemática en 3D de las AIN en el DEM.

Elaboración propia