

PROCESOS GEOMORFOLOGICOS Y ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS EN EL RIO ORINOCO

David Pérez Hernández¹ y José Luis López²

¹ Dirección de Hidrología y Meteorología, Ministerio del Ambiente MARNR.

² Instituto de Mecánica de Fluídos, Facultad de Ingeniería, UCV.

RESUMEN

El Río Orinoco y el Río Amazonas se unen a través del Brazo Casiquiare-Río Negro, conformando el mayor sistema interconectado de drenaje del planeta con una superficie total de 7 millones de km² correspondiéndole un 14 % a la cuenca del Orinoco y en término de la magnitud de sus caudales, representan el primer y tercer río del mundo, respectivamente. Ambos sistemas fluviales drenan extensas áreas de la franja ecuatorial de Sur América y participan de notables particularidades en el régimen climático, topografía, cobertura vegetal, relieve, naturaleza geológica de las tierras y sistemas orográficos circundantes, que les distinguen de otros grandes ríos del mundo. El propósito de este trabajo es describir los más importantes procesos hidroclimatológicos, geológicos y erosionales que determinan las estructuras geomorfo-fluviales del río Orinoco. Se presenta una descripción de algunas relaciones morfométricas vinculadas al desarrollo de la red de drenaje, al área de la cuenca y al perfil longitudinal del canal. Finalmente se describen las estructuras del lecho y sedimentarias más importantes tales como rápidos, barras, islas, dunas y otras de la planicie fluvial en la zona de contacto del Escudo con los llanos. El estudio de estas estructuras es necesario para comprender las características y evolución del canal, así como para evaluar su influencia en el mejor aprovechamiento del río con fines múltiples, especialmente para la navegación fluvial.

GENERALIDADES

El Río Orinoco desarrolla su cauce sobre el borde septentrional del Escudo Guayanés, formado por rocas cristalinas de edad precámbrica y esta bordeado por su margen izquierda al penetrar en las planicies, por aluviones y sedimentos recientes de los llanos de Venezuela y Colombia. Sobre el Escudo, la erosión ha causado en un proceso de peneplanación, la remoción gradual pero continua a través del tiempo geológico, de gruesos espesores de sedimentos de una extensa cubierta plataformal -*la Serie Roraima*- de la cual subsisten altiplanicies dispersas y aisladas sobre las rocas cristalinas del basamento igneo-metamórfico conocidas como los Tepuis. En esta región, el río Orinoco como sus tributarios, desarrollan sus cursos sobre un basamento estable, con una gran influencia de controles geológicos, especialmente del tipo geofracturas, diques y afloramientos rocosos del basamento, estos últimos son más resistentes a la erosión y resaltan sobre el relieve a modo de "inselberg", lo cual dicta la configuración y el patrón de las redes de drenaje, siendo común las curvaturas abiertas y asimétricas, los cambios bruscos de orientación en los canales, las caídas y raudales, abundancia de islas rocosas estables y las capturas fluviales activas, siendo la más conspicua la interconexión del brazo Casiquiare.

Las cuencas que drenan el Escudo Guayanés, reciben módulos de precipitación más elevados respecto a otras, ello combinado al carácter cristalino de las rocas, producen magnitudes superiores de escorrentía dentro de un ambiente geológico sometido a intensa alteración meteórica y protegido por una densa cubierta boscosa tropical; en contraste, los suministros sólidos son relativamente bajos y están representados por arenas que resultan de la meteorización de rocas ígneo-metamórficas.

Los ríos que descienden de los Andes, de la Cordillera de la Costa y atraviesan las llanuras con relativamente bajas pendientes, son más numerosos y presentan rendimientos sólidos más significativos, especialmente en aportes de materiales finos y compuestos solubles. Río como el Guaviare, Inirida, Vichada, Meta, Cinaruco, Arauca y Apure, formados por la unión de numerosos tributarios que descienden de Los Andes, evidencian prominentes cambios evolutivos, especialmente en la adyacencia del río Orinoco, donde la acumulación de sedimentos ha favorecido el desarrollo de complejas estructuras deposicionales y formas erosionales en su extensa planicie fluvial. En el sector medio e inferior del Orinoco, el río recibe importantes tributarios que drenan el Escudo como el Caura, Aro y Caroní (regulado con el Embalse de Guri), mientras desde los llanos Centrales y Orientales de Venezuela, recibe pocos afluentes con relativamente bajos rendimientos líquidos y sólidos. En este recorrido el canal permanece disectando alternadamente aluviones y rocas del basamento, formando una amplia curvatura conocida geográficamente como el Arco Orinoquense. Se trata de una inflexión que experimenta el canal, que orientado de sur a norte en la parte media, gira al este permaneciendo adyacente al Escudo, hasta finalmente descargar al Océano Atlántico a través de un delta de 30.000 km², el único que ofrece una estructura de este tipo entre los grandes ríos de Sur América.

Para entender los cambios y etapas evolutivas del canal desde una perspectiva histórica, en los más recientes tiempos geológicos, es necesario considerar un conjunto de procesos que han gobernado dicha evolución. Estos son de carácter geológico, paleoclimáticos, hidrológicos, vinculados a mecanismos erosionales eólico-fluviales y deposicionales, lo que contribuye a definir las diversas estructuras geomórfico-fluviales de la cuenca y de la planicie fluvial.

PROCESOS GEOLÓGICOS

Las diferencias en la litología, el relieve y otros caracteres fisiográficos de las tierras que conforman el Escudo de Guayana, con respecto a las áreas de llanuras y montañas jóvenes como son la Cordillera de la Costa y los Andes, imponen a los ríos que drenan estas tierras, notables variaciones y diferencias en las tasas de suministro, tipo de materiales y formas deposicionales, al producirse una gradación en el tamaño y en el transporte de los sedimentos desde las montañas, hasta sus confluencias con el Río Orinoco. Gradualmente la emergencia tectónica de estas jóvenes montañas que iniciaron su emergencia en el terciario, ha determinado se incrementen los gradientes fluviales y subsiguientemente el suministro de sedimentos, que tienen como sitio de disposición intermedia el canal y la planicie fluvial del Río Orinoco (antes de llegar finalmente al océano). Un progresivo aumento de los aportes sólidos, junto con el ajuste de las pendientes regionales por causa del tectonismo, contribuyen a desplazar el cauce y a desarrollarse su planicie en el borde geológicamente más estable, el cratón ígneo-metamórfico de Guayana.

La tectónica se manifiesta a escala regional y local con diferentes intensidades a través del tiempo geológico. Movimientos de naturaleza epirogenéticos e isostáticos prosiguen en la actualidad afectando el continente sur americano. Localmente, procesos diastróficos tales como fallamientos y emergencia en las jóvenes cordilleras, contribuyen al basculamiento de los depósitos de planicies, afectando unidades geológicas del cuaternario, situadas al borde del canal del río Orinoco que cubren los Llanos en el tramo medio e inferior, impulsándolo a estabilizarse cerca del basamento. Algunos geólogos sostienen, según la posición estructural y la elevación de algunas

mesas situadas al norte del Orinoco, que estos sedimentos han experimentado emergencias neotectónicas durante el Pleistoceno y Holoceno.

Tales mecanismos han contribuido a desplazar el canal del Río Orinoco y a modificar las redes con alteración de los patrones de meandros en los ríos de los llanos, a activar procesos erosivos en los lechos y en las mesetas y sus bordes, a producir migración de los tributarios en las confluencias, esto último resultado de la deposición de sedimentos en forma de deltas interiores o por causa de la removilización de los materiales por el Río Orinoco, durante las sucesivas crecidas anuales.

Un factor geológico que condiciona la estructura y morfología del canal del Orinoco, es que el río disecta a intervalos de longitud irregular sus propios aluviones (canal aluvial), mientras que en trechos locales, desarrolla su cauce sobre el basamento rocoso estable y ello determina variaciones significativas en la resistencia al flujo y subsiguientemente, en el suministro y la capacidad de transporte del sedimento, existiendo a intervalos controles estructurales en el canal. La alternancia en amplios tramos de expansiones y contracciones en el canal, y la aparición de barras e islas móviles de diferentes configuraciones y grado de estabilidad, son un reflejo de tal efecto.

EFFECTO DE LAS GLACIACIONES EN EL CUATERNARIO

Las fluctuaciones de los niveles del mar durante el Pleistoceno cuando ocurre la más reciente glaciación con sus cuatro lapsos interglaciales, representan dentro del ámbito de los procesos paleoclimáticos, un mecanismo que ha afectado la evolución del canal del Río Orinoco y a las estructuras fluviales asociadas, en una forma significativa. El proceso de congelamiento durante la glaciación del cuaternario produjo la incorporación de 35.000 km³ de aguas oceánicas a las continentales, incrementándose la masa de los glaciales y produciéndose un descenso de los niveles en 120 m por debajo del nivel del mar en el presente. Los grandes ríos del mundo, han experimentado cambios dramáticos en las estructuras de sus canales como en las planicies fluviales. Profundas disecciones de los lechos en los lapsos de máxima extensión de los glaciales, seguido de acumulaciones de materiales se produjeron al ocurrir los deshielos, lo que aconteció luego de la recuperación de los niveles marinos con variaciones en la extensión de las tierras continentales, debido a compensaciones isostáticas. El proceso de erosión en áreas periglaciales debió ser muy intenso. Al pie de los Andes de Venezuela y Colombia, y en los valles altos transicionales de numerosos ríos tributarios, existen remanentes de terrazas y depósitos de origen glacial y fluvio-glacial, que han estado suministrando - lo que prosigue en la actualidad-, enormes volúmenes de sedimentos al Río Orinoco.

Es de esperar que con gradientes fluviales mayores, al ocurrir condiciones de máximo paroxismo en la actividad glacial y permanecer los niveles marinos más bajos que los actuales, la capacidad erosiva como el transporte sólido en el canal, han debido ser superiores a las del presente. Se han atribuido a tales efectos la presencia de saltos y depresiones prominentes en la región que bordea al Escudo, tales como los Raudales de Atures-Maipure, Cariben, El Infierno, Orocopiche, etc., los cuales resultarían del reajuste del perfil longitudinal y de las pendientes locales, a la modificación de la posición del nivel de base representado en el mar, estimándose que la separación de la costa deltáica respecto a la actual era de 75 km. En consecuencia, la disección de estos sedimentos deltáicos como los del propio canal en un amplio sector del tramo inferior, han debido ser significativos, hasta desarrollarse rellenos de materiales gruesos y

conformarse depresiones erosionales, actualmente recubiertos tal vez por sedimentos recientes. El diagrama A esquemático ilustra la forma como el cambio y los niveles del mar, afectaron la estabilidad y posición del lecho del canal en el tramo inferior y el papel de los controles estructurales.

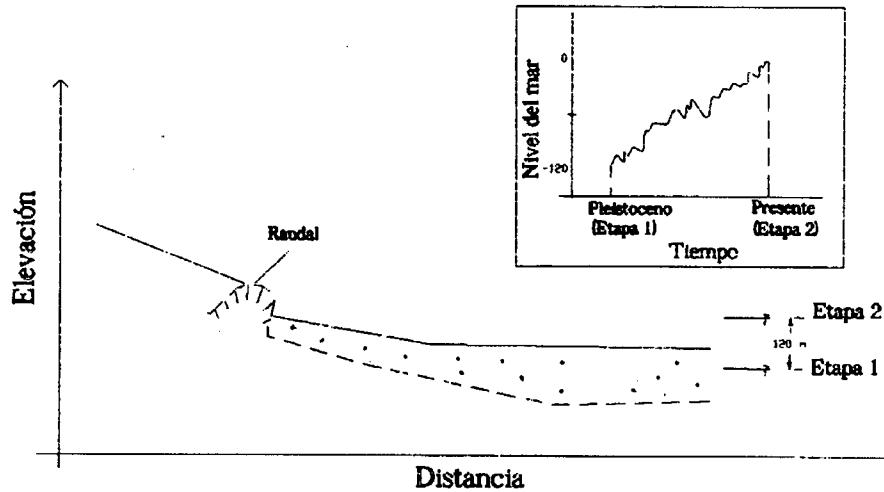


Diagrama A. Perfil esquemático del cambio en el nivel del mar desde el Pleistoceno (Etapa 1) hasta el presente (Etapa 2).

Materiales conglomeráticos y gravas sometidas a diferentes ciclos de transporte, se encuentran dispersos o afloran en localidades diferentes de la formación Mesa, ocupando variados niveles altitudinales; en la actualidad sin embargo, no se produce transporte de estos materiales ni estos forman parte del lecho, ya sean estabilizados o expuestos superficialmente en el tramo medio e inferior del curso del Río Orinoco. Un efecto complementario no menos importante, ejercido por las fluctuaciones de los niveles del mar durante el Pleistoceno, se relaciona con la acelerada erosión regresiva y desarrollo de diferentes niveles altitudinales en la formación Mesa, lo que conjugado a los procesos de emergencia tectónica, ha contribuido a la conformación de mesas tabulares con avanzados grados de erosión en sus bordes, constituyendo un patrón de drenaje conocido como "bad lands", lo que se observa en la mayoría de las mesas de los estados Guárico, Anzoátegui y Monagas.

La transición del tope de las mesas en los niveles inferiores de los Llanos bajos y hacia la planicie del Río Orinoco, se produce a través de escarpados y farallones con declives subverticales. En algunos sitios, los niveles de transición reflejan estados intermedios de estabilidad en los procesos de morfogénesis. En Barrancas la diferencia actual entre el tope de la mesa y la planicie fluvial del Orinoco es menor a 10 m., en el borde de la laguna Mamo es de 60 m., en Uracoa es de 20 m, en las inmediaciones de Soledad (frente a Ciudad Bolívar) la diferencia altitudinal es de 30 m, y en la terraza de Musinacio, cercana a Mapire (Anzoategui) es de 60 m.

En el Sector Zuata Río Caris la erosión geológica ha progresado en forma regresiva hasta remover prominentes espesores de sedimentos que contribuyen al desarrollo y

expansión de la planicie fluvial del Río Orinoco. En tanto hacia las tierras de los llanos centrales, situadas al oeste del Río Zuata, que son drenadas por morichales como los del Diablo, Iguana, Manapire, Mocapra, San Bartolo, etc., no se presentan en las adyacencias a la planicie fluvial del Orinoco tales patrones de erosión.

PROCESOS HIDROLÓGICOS

Desde el punto de vista hidrológico, el mecanismo condicionante de evolución de las estructuras de la planicie en el Río Orinoco, y el cual se asocia a la forma del hidrograma y magnitud de los caudales generados a partir de una cuenca con una superficie drenada de cerca de un millón de km², se refleja en las amplias variaciones de los niveles entre los períodos seco y lluvioso, en particular en la parte media y baja del canal, registrándose variaciones de 11,5 m en Caicara, 17 m en Musinacio (Mapire), 16 m en Ciudad Bolívar y 9 m en Barrancas, situada en el vértice del Delta.

Esta fluctuación de niveles difiere notablemente de lo observado en otros grandes ríos del mundo (Río Amazonas, 8 m en el tramo inferior) y origina mecanismos de erosión-deposición en áreas de la planicie, así como formas fluviales que adquieren características únicas en el Río Orinoco. Tan amplias fluctuaciones de nivel en esta franja de tierras de bajas pendientes, y con accidentes topográficos que determinan ensanchamiento de las áreas marginales con bajo relieve, causan notable extensión de las zonas de cubrimiento de las aguas en el período correspondiente a la ocurrencia del pico del hidrograma y una considerable reducción de las secciones mojadas en el período seco. Ambas condiciones se mantienen por un relativamente largo período, registrándose valores extremos de saturación y desecación de los suelos y sedimentos, al ser cubiertos por las aguas o exponerse a la atmósfera, para que respectivamente operen en forma alternada, procesos fluviales y eólicos de remoción y transporte.

PROCESOS EÓLICO - FLUVIALES

Dentro de los mecanismos más interesantes y complejos asociados al transporte de los sedimentos por el Río Orinoco, resalta la acción combinada del recogimiento y transporte fluvial en el canal por la acción del viento sobre las diferentes estructuras de la planicie y el lecho, al producirse el descenso de los niveles. Particularmente este último opera en el tramo medio a partir de la boca del Río Capanaparo, con diferentes intensidades de transporte y movilización según sea la superficie del lecho expuesto a la atmósfera, el tipo de sedimento y la intensidad, velocidad y dirección de los vientos. En estudios previos (Nordin y Pérez Hernández, 1989), se ha estimado que un 40% de la superficie del canal en aguas bajas, es sometido a la acción directa de los vientos alisios procedentes del noreste, los cuales son muy activos en la zona durante el período seco y son capaces de removilizar materiales, antes transportados por el río, en dirección aguas arriba y deformar o superponer las estructuras eólicas a las formas sedimentarias de origen fluvial que subsisten, después que se produce el descenso de niveles del Río Orinoco. Este mecanismo opera además, sobre los suelos más distantes de la planicie, desplazando dunas longitudinales y barcanas localizadas algunas a varios kilómetros al norte del canal del Río Orinoco (La Peña en la cuenca del Río Manapire, por ejemplo en el Estado Guárico). Esto origina cambios en la orientación del drenaje de tributarios, obstrucción de bocas y desplazamientos de las confluencias. El proceso de recogimiento y transporte por acción del viento en dirección al oeste, es responsable de la formación del extenso campo de dunas que se ha desarrollado en los llanos del sur del Edo. Apure y cuya extensión aproximada es de 30.000 km².

El desplazamiento de arenas hacia el oeste de los llanos Apureños, ha contribuido a alterar los patrones de drenaje de numerosos ríos, a modificarse el microrelieve de los llanos bajos. La presencia de los campos de dunas, favorece se produzcan almacenamientos de aguas superficiales que subsisten después del período lluvioso. Otro efecto inducido por la variación del microrelieve se refleja en la tendencia del cauce del Río Orinoco a desplazarse y estabilizarse progresivamente hacia el borde del escudo, con desarrollo de extensas islas, algunas estables en el tramo considerado y a formarse complejas estructuras fluviales, en las áreas donde los mecanismos de transporte eólico y fluvial se mantienen activos.

Estos procesos se han desarrollado dentro de una escala de tiempo geológico y quizás fueron más intensos en el pasado, cuando la acción del viento fue mayor como se evidencia por la existencia de dunas estabilizadas distantes del borde del escudo, constituidas por arenas cementadas por una matriz ferruginosa, lo que sugiere que la serie Imataca, adyacente a la planicie fluvial del Orinoco en la parte media del cauce, representó una fuente adicional de suministro de sedimentos, los cuales fueron desplazados y movilizados por el viento a mayores distancias hacia los llanos. En el presente, la fuente de suministro sólido para mantener el mecanismo de transporte, consiste en los sedimentos aluviales recientes del Río Orinoco y sus tributarios, que dispersan sus cargas en la planicie en un continuo proceso de reciclaje de materiales donde el transporte fluvial domina en condiciones de altos caudales y la resuspensión por el viento, se produce en bajos niveles de los ríos, cuando los materiales que conforman los lechos y la planicie fluvial, se exponen a la atmósfera y pueden ser activados y transportados por el viento.

PATRÓN DE DRENAJE EN EL CANAL Y ESTRUCTURAS FLUVIALES

EL concepto "Patrón de Drenaje" define la configuración que ofrece el canal o el conjunto de éstos, cuando se observan en mapas, vistas o fotos aéreas. Debido a las dimensiones geométricas de grandes ríos como el Orinoco, comparado con otras corrientes fluviales, es necesario tomar en cuenta la escala de los mapas y la condición del flujo, para definir la extensión del canal sometido a la influencia de los niveles del agua. A gran escala, el canal del río Orinoco presenta la configuración de un arco que bordea la zona de contacto entre sedimentos no consolidados de los llanos, con las rocas cristalinas del Escudo Guayanés. Al considerarse escalas geográficas detalladas, resalta en el patrón morfológico del canal, la existencia de una secuencia no alternada ni regular de relativamente cortos tramos en contracción, seguidos de expansiones que se repiten con diferentes separaciones a lo largo de la extensión del canal, en respuesta al efecto del control litológico y de las estructuras geológicas.

Tomando en cuenta el valor de la sinuosidad, definida como la relación entre la longitud total del canal con respecto a la longitud del valle o de la planicie fluvial en la dirección general del gradiente topográfico, el río Orinoco en el tramo medio e inferior, se comporta como un canal recto, con una diversidad de geoformas superimpuestas dentro de la planicie fluvial, que no difieren de las encontradas en otros ríos, incluidos los de pequeñas dimensiones.

Dentro del canal resaltan sin embargo las islas fluviales, barras arenosas (de punta y alternadas), dunas (eólicas, fluviales y mixtas), rizaduras eólicas y subacuáticas, afloramientos rocosos en zona de raudales (rápidos), las cuales pueden experimentar modificaciones al evolucionar con el tiempo y según la condición del flujo. La planicie

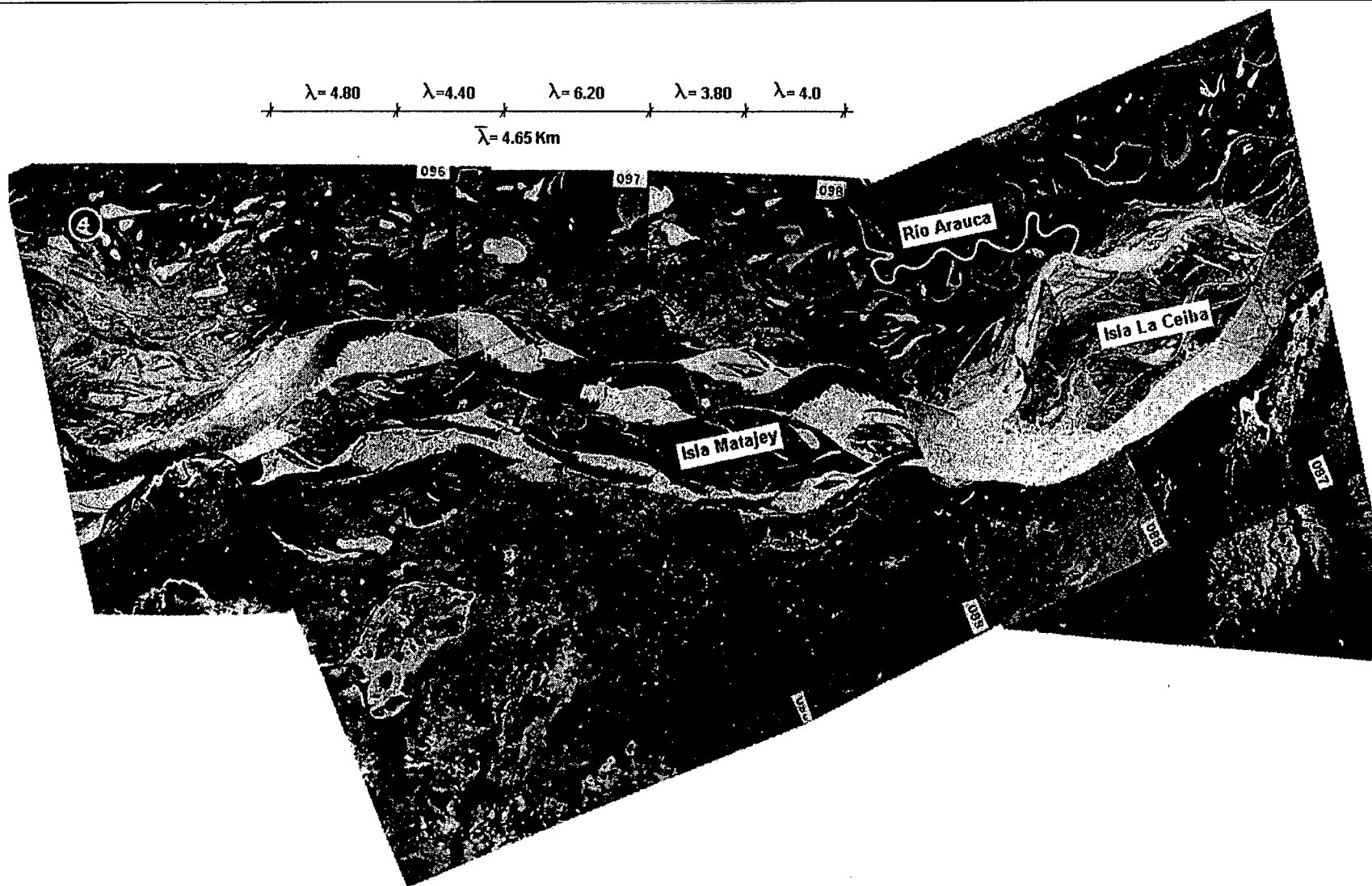


Figura 1.- Patrón de barras alternadas del Río Orinoco al borde de la Isla Matajey (λ representa la longitud de onda de las barras).

fluvial, de acuerdo a la extensión, grado de cobertura vegetal y complejidad en los procesos fluviales, presenta diferentes aspectos según el tramo considerado. En un sector donde la planicie tiene amplio desarrollo, tal como ocurre en la zona de confluencia de los ríos de llanura (Figura 1), como se observa en la unión del río Arauca con el Orinoco por ejemplo, se pueden identificar las siguientes estructuras geomórfico-fluviales: islas, barras, canales laterales activos o inactivos, caños y canales tributarios, segmentos estrangulados de canales, lagos en medialuna (oxbow), espirales de meandros, restos de paleocanales, diques naturales y bancos colonizados por vegetación, depósitos en los bajíos, depósitos en franjas paralelas a los canales actuales o antiguos, lagunas y humedales estacionales o permanentes. Depósitos de polvo y arena, son comunes en el interior de la planicie y dispersados más allá de sus contornos, si en el sector existe acción eólica. En condiciones de aguas altas, la configuración de muchas de estas estructuras, se modifican o no se observan en toda su extensión, mientras otras cobran mayor significación como son las islas fluviales. Mayores detalles sobre la evolución de estas estructuras de la planicie se mencionan en López y Pérez Hernández (1998).

En la época lluviosa, al incrementarse el caudal, gran extensión del canal y de la planicie se cubren por las aguas, se activa el flujo por los canales laterales incorporándose segmentos de la planicie al cauce, y las lagunas y humedales adquieren mayor importancia y expresión, especialmente hacia los sectores medios y bajos de la planicie. Estas pueden permanecer conectadas al río Orinoco a través de caños, estar aisladas en la planicie o recibir aportes de tributarios que se desbordan y divagan por tierras con deficiente drenaje, pero su condición natural es a mantener almacenamientos de agua debido a la conexión hidráulica existente con el río Orinoco, a través del sistema de flujo sub-superficial

PERFIL LONGITUDINAL

La configuración del perfil longitudinal del Río Orinoco ofrece contrastes según se considere su desarrollo a través del sector Escudo de Guayana o siguiendo hacia los Andes de Colombia por el curso del río Guaviare, donde el canal presenta una mayor extensión. La mayor convexidad del perfil ocurre hasta la cota de 100 msnm., siendo pronunciado el gradiente topográfico al frente de la Cordillera Andina, que registra elevaciones máximas en Colombia de 4560 msnm en el Cerro El Nevado y en Venezuela de 5.007 msnm en el Pico Bolívar respectivamente y de cuyos nudos orográficos se desprenden tributarios que se integran a la red de drenaje. La transición de estos ríos hacia las llanuras es abrupta y se produce mediante la disección de depósitos sedimentarios - morrenas, terrazas, y depósitos en valles de relleno -, de origen fluvio-glacial que han sido sometidos a efectos de emergencia tectónica vinculados al levantamiento de los Andes a partir del terciario.

En el tramo superior del alto Orinoco la altura de la divisoria es menor respecto a los segmentos montañosos y remanentes erosionales interiores a la cuenca, como son los Tepuis (Duida, Parú, Java, Marahuaca) o la Serranía de Maigualida, que exhiben mayores altitudes a las observadas en las cabeceras del río Orinoco. El perfil longitudinal (Figura 2) en este sector, se caracteriza por el control que ejerce una secuencia escalonada de bloques, cuyas transiciones topográficas se producen a través de rápidos y raudales, donde el canal se encuentra confinado en el lecho rocoso, estando su curso controlado por prominentes geofracturas y alineamientos tectónicos que producen amplias curvaturas del río, patrones asimétricos de meandros y bruscos

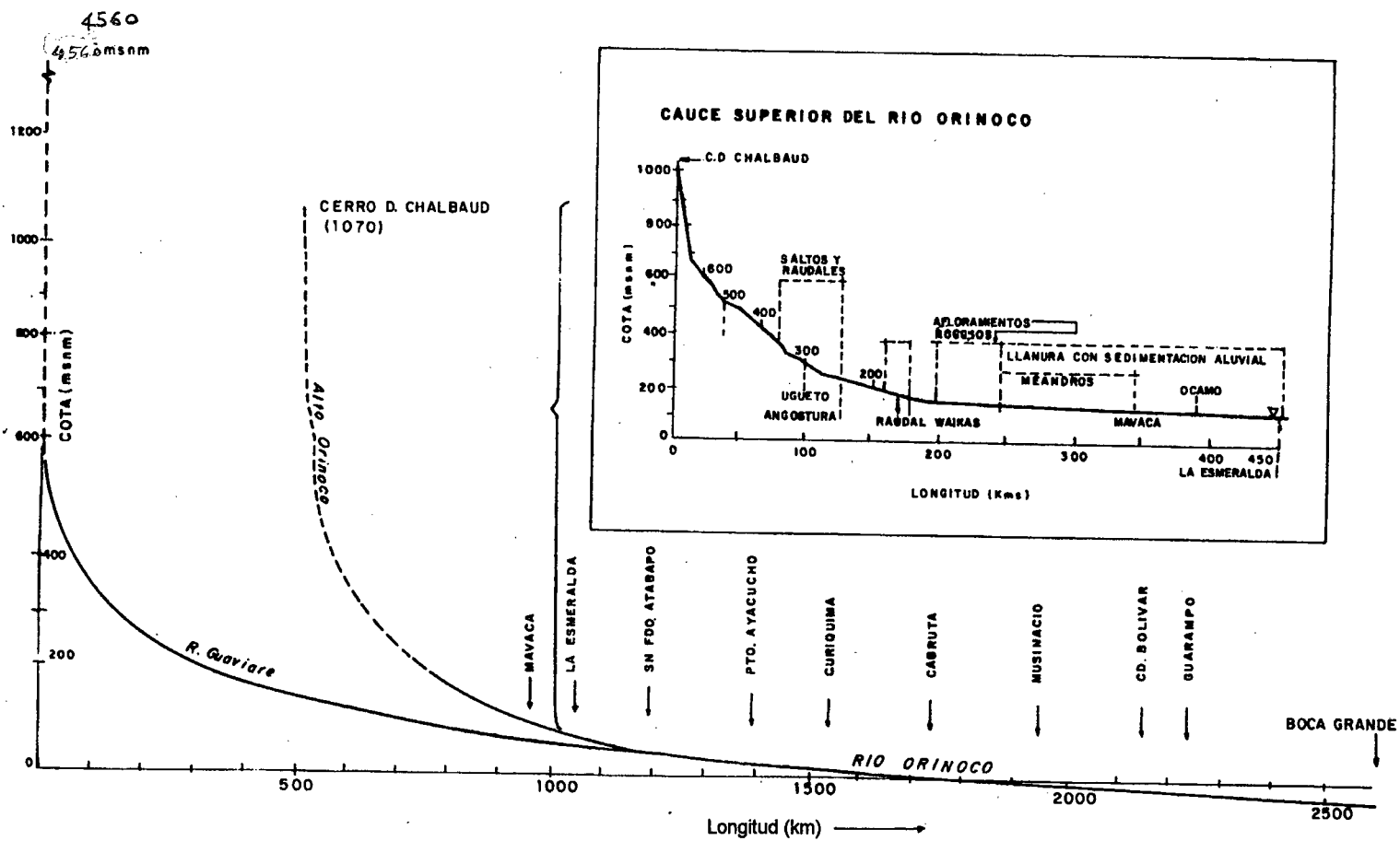


Figura 2.- Perfil longitudinal del Cauce del Río Orinoco

cambios de orientación en las redes de drenaje. Esta sección del perfil en los primeros 450 km se muestra en el recuadro superior de la Figura 2, indicándose los tramos con saltos, raudales, afloramientos de rocas y desarrollo de llanuras formadas por sedimentación aluvial.

Los saltos y raudales presentan poca diferencia de elevación y no producen quiebres o cambios notables del perfil longitudinal. Ellos representan controles estructurales e hidráulicos locales que regulan las pendientes del canal y se caracterizan por poseer una distribución irregular en el lecho de afloramientos rocosos, los cuales pueden ser cubiertos por las aguas en altos niveles, pero en el período de bajos niveles, se exponen superficialmente, representando escollos para la navegación.

RELACIONES GEOMÉTRICAS EN LA CUENCA

La cuenca del río Orinoco presenta un factor de forma $-F_f-$ definido por la relación:

$$F_f = A / La^2 = 0,40 \tag{1}$$

donde $-A-$ es el área de drenaje y $-La-$ es la longitud del eje axial, orientado en un sentido Nor-Este, y el cual se mide entre el ápice del vértice deltaico y la extensión máxima del punto más elevado y distante desde la desembocadura que corresponde a las cabeceras del río Guaviare - adopta el nombre de Guayabero -, situado en los Andes Colombianos. La relación promedio entre el ancho y la longitud de la cuenca es de 2, contribuyendo la extensión que penetra hacia el Alto Orinoco, sector de la cuenca que abarca el Estado Amazonas de Venezuela, a crear cierta asimetría en la distribución areal.

En numerosas cuencas con variables dimensiones geométricas y diversas características geológicas y climáticas, se han determinado relaciones entre las áreas de drenaje y la longitud principal del cauce $-L-$, así como otras variables relacionadas con el flujo. Una de las más constantes y estables expresiones de este tipo, ha sido desarrollada por Hack (citado en Leopold et al, 1964) y se ilustra en la Figura 3 :

$$L = 1,4 A^{0,64} \tag{2}$$

siendo el área $-A-$ expresada en millas² y la longitud $-L-$ en millas.

Una de las conclusiones que se infiere de esta expresión, es que a medida que la longitud del canal se incrementa desde las cabeceras hacia la zona de descarga, la tendencia general en las cuencas es a experimentar elongación. En el caso del Orinoco y del Amazonas, los puntos que las identifican indican que para la longitud dada del canal, las áreas son superiores a las indicadas por la tendencia de la recta a escala logarítmica (Figura 3).

Para diferenciar el comportamiento de las cuencas de ríos tributarios que drenan rocas cristalinas del Escudo de Guayana, de las que atraviesan las zonas de llanuras, se ha preparado la Figura 4. En ella se presentan las relaciones área-longitud para ríos de ambas regiones, mostrándose las ecuaciones de mejor ajuste. En ambos casos existe la tendencia a producirse elongación de las cuencas, ajustándose mejor los ríos de llanuras en lo relativo a la pendiente de la recta (ecuación (2)). Sin embargo, ambos casos difieren en lo relativo a la longitud del canal asociado a un área unitaria de drenaje, que

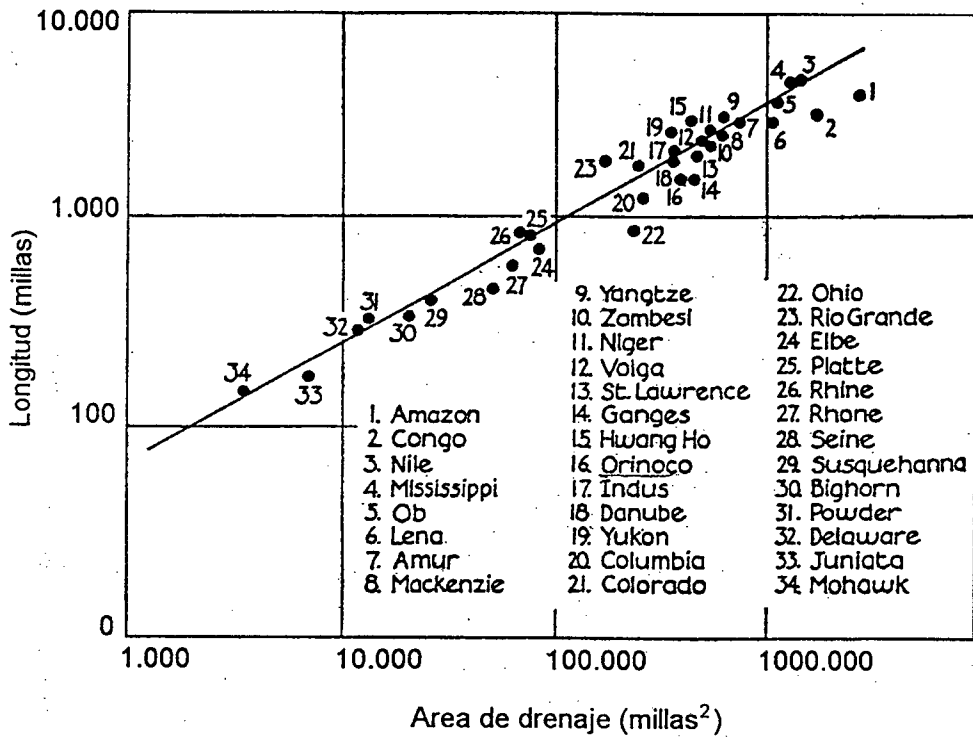


Figura 3. Relación Area de Drenaje vs Longitud del cauce principal en los ríos más importantes del mundo.

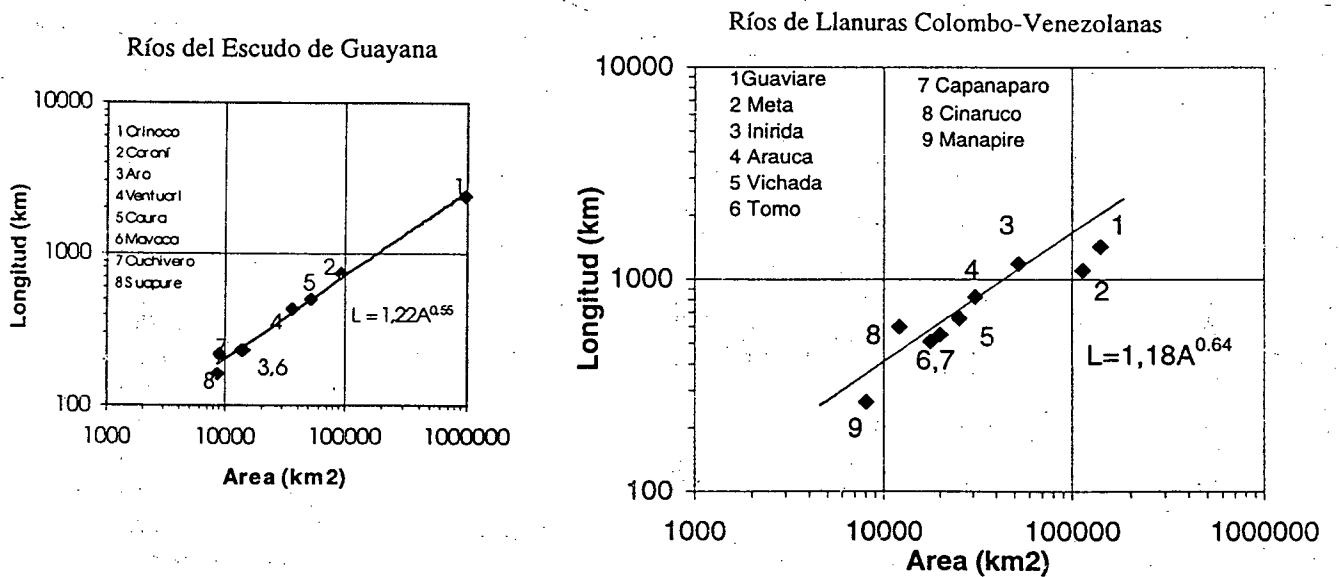


Figura 4. Relaciones de Areas de drenaje vs Longitudes del canal principal en tributarios del Orinoco

es notablemente inferior (1,18 – 1,29 km) respecto al valor indicado por la ecuación (2) que es de 1,4 millas (2,25 km).

SINUOSIDAD DEL CAUCE

La Tabla 1 presenta las características del Río Orinoco en el tramo bajo e inferior en donde se identifican las siguientes variables geométricas: L_{CP} es la longitud del canal principal; L_{CS} es la longitud del canal más sinuoso; L_P es la longitud de la planicie fluvial; B_{max} es el ancho máximo del cauce; B_{min} es el ancho mínimo del cauce; λ_{CP} es la sinuosidad del cauce principal; y λ_{CS} es la sinuosidad del canal más sinuoso. La subdivisión en subtramos se hace de acuerdo a las características geomorfológicas de cada sector. En todos los casos se aprecia que la sinuosidad del cauce es inferior a 1,50 por lo que se concluye que el Río Orinoco no es de carácter ameandreado.

Subtramo	L_{CP} (km)	L_{CS} (km)	L_P (km)	B_{max} (km)	B_{min} (km)	λ_{CP}	λ_{CS}
El Jobal - Contracción Los Caracaros	86	100	84	10	1,2	1,02	1,19
Los Caracaros - Boca de Apure	72	80	70	8,0	1,2	1,03	1,14
Boca de Apure - Las Bonitas	90	96	90	5,4	1,8	1,00	1,07
Las Bonitas - Mapire	118	124	114	8,0	1,3	1,04	1,09
Mapire - Boca Río Aro	98	120	92	10,0	1,0	1,07	1,30
Boca Río Aro - Ciudad Bolívar	80	86	70	6,0	1,4	1,14	1,23
Ciudad Bolívar - Matanzas	84	108	78	8,6	0,8	1,14	1,38

Tabla 1. Características geométricas del Río Orinoco en el tramo medio e inferior.

DESARROLLO DE BARRAS FLUVIALES

De las estructuras más frecuentes y de gran extensión superficial en el canal del río Orinoco, las barras arenosas junto con las islas fluviales, son las que atraen la mayor atención cuando se observa el río en aguas bajas. Las primeras al ser sometidas a la erosión durante los flujos medios y altos, experimentan cambios y transformaciones más acentuadas, llegando a ser removidas y desplazadas por el flujo, lo que ocurre con mayor intensidad en las inmediaciones a las confluencias con los contribuyentes que aportan apreciables cantidades de sedimentos arenosos, tales como el Meta, Arauca, Apure, Cuchivero y Caura.

Donde la acción eólica se combina al transporte fluvial, el mecanismo que controla la estabilidad, crecimiento o migración de estas barras, se hace complejo, presentándose formas compuestas; por ejemplo, existen estructuras mixtas de dunas eólicas superpuestas a las fluviales, con crestas indicando desplazamiento en sentido contrario al transporte fluvial (tramo Boca del Arauca –Cuchivero-Punta Brava).

Las barras de punta, tal como se presentan en ríos ameandreados de llanuras, no son comunes de observar en las áreas con curvaturas en el río Orinoco, una representativa se forma frente a la población de Cabruta. Se piensa que de existir temporalmente en forma subacuática, estas son luego removidas por los flujos elevados del río Orinoco, mediante la formación de canales laterales que separan la barra del resto de la planicie, la cual al ser colonizada por la vegetación forma islas estables (clasificadas posteriormente como de convexidades). Estas islas son progresivamente disectadas, por

varios canales, creándose un complejo múltiple de otras más pequeñas, como las identificadas en el tramo inferior: La Isla Venado, Bernabela, el conjunto de Islas La Ceiba, Buenos Aires, El Perro, situadas estas últimas en las inmediaciones de Matanzas. Las barras alternadas no son frecuentes en el canal del río Orinoco, y sólo se observan en condiciones de aguas bajas en sectores localizados. Un ejemplo representativo se ha identificado frente a la isla alargada de Matejey (Figura 1). Aquí el río se bifurca creando un canal lateral adyacente a las rocas duras del Escudo, donde se presenta un patrón de barras alargadas y asimétricas, lo que contrasta con lo ocurrido en el canal principal, donde la regularidad en la posición y forma de las barras se conserva. Ambos canales presentan similar alineamiento con anchos de 1,6 y 2,4 km, respectivamente y en el tramo de 30 km, del canal principal, existe un conjunto de barras alternadas que mantienen una separación entre sus centroides de áreas, en el rango de 3,8 a 4,8 km, con un valor promedio de 4,65 km siendo su longitud promedio de 5 km. (Figura 1).

El flujo al confinarse en el canal en aguas medias y bajas, produce una removilización progresiva del depósito del lecho, creando una tendencia al ameandreamiento formándose las barras alternadas. Desafortunadamente, no se dispone de vistas aerofotográficas de diferentes épocas en el sector, que permitan hacer un seguimiento a la evolución de estas estructuras.

DUNAS FLUVIALES

Mediciones detalladas de la geometría de las dunas fluviales en el Río Orinoco han sido presentadas por Nordin y Perez Hernández (1989), en distintos sectores del Orinoco, utilizándose mediciones con ecosondas y directas de las estructuras expuestas en el lecho. Estas mediciones se realizaron en los años de 1982 y 1983, durante distintas condiciones hidrológicas.

Las estadísticas de las mediciones directas efectuadas en las inmediaciones de la Isla Chimborazo, aguas abajo del raudal San Borja, indican que estas dunas presentan un longitud de onda promedio de 69 m con una amplitud de 1,6 m, encontrándose pocas variaciones entre 1982 y 1983. Similarmente, en Isla Pañuela, las dunas promedian 80 m de longitud de onda (L) y 2 m de altura de cresta (H), lo cual indica un índice de rizadura L/H de 40.

En las inmediaciones de Cabruta los resultados obtenidos para las mismas características en base a mediciones de 10 dunas indican valores promedios de L=104 m y H=1,5 m, en Marzo de 1982, y de L=125 m y H=1,6 m en Marzo de 1983. Las mediciones efectuadas con ecosondas en tres secciones separadas cada 100 m, paralelas a la ribera izquierda en Cabruta, arrojaron valores de L= 62 m y H=1,6 m en el mes de Junio de 1982, y de L=61 m y H=1,8 m en Noviembre de 1982. Recientemente se practicaron mediciones de las formas del lecho en Musinacio durante el pico de la creciente anual, registrándose dunas con $2,5 > H < 4,5$ m de amplitud y L= 45-65 m; la profundidad del flujo fue de 36 m, siendo el diametro medio del material del lecho 0,8 mm. Información adicional sobre datos granulométricos y de las estructuras sedimentarias en las dunas puede conseguirse en la referencia anteriormente mencionada y en McKee (1989).

ISLAS FLUVIALES

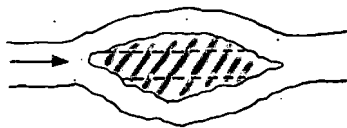
Dentro de las estructuras sedimentarias en el cauce del Orinoco resaltan las islas fluviales. Existen patrones múltiples y complejos de estas estructuras, su evolución y

grado de estabilidad está asociado a diferentes factores tales como, la acción hidrodinámica del flujo, la resistencia y estabilidad de los materiales que la constituyen, y la forma como la vegetación es capaz de colonizar y fijarse o adaptarse a las condiciones de fluctuación de niveles de las aguas y naturaleza del sedimento.

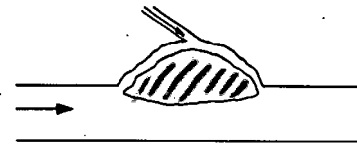
En vista de la diversidad de formas encontradas a lo largo del canal, se ha considerado de interés realizar una clasificación de las islas fluviales atendiendo a la posición de la isla con respecto al canal principal y a la configuración morfológica que estas presentan en el sector de ocurrencia. La Figura 5 muestra diferentes patrones esquemáticos para cada uno de estos tipos de islas. En estos pueden formarse canales de disección dependiendo de la alineación del flujo. A continuación se describen las características más importantes de los diferentes patrones identificados.

1. *Islas centrales*: se localizan en la zona central del canal el cual se subdivide en dos ramales o brazos, uno principal y otro lateral o secundario. Ejemplos de este tipo de islas son: El Troncón, El Baulito, La Gallina y Gallineta, Los Pollos y El Venado.
2. *Islas en convexidades*: se desarrollan en las zonas convexas de los tramos del río y se ubican adyacentes al canal principal. En su origen, en adición al transporte de sedimentos del río, pueden estar asociadas a la presencia de tributarios. La acción del flujo en el canal principal durante las crecientes puede separar una barra de punta y convertirla en una isla de este tipo. Ejemplos de este tipo de islas son: Tucuragua, Luciadero, Los Barrancos, Guasimal, La Islita, Bernabela y Grande o Panapana.
3. *Islas en concavidades*: se desarrollan en las zonas cóncavas de los tramos rectos o sinuosos del río, y que se ubican adyacentes al canal principal. En la misma forma que las anteriores, su origen puede estar asociado a la confluencia de uno o varios tributarios. Ejemplos de este tipo de islas son: Lindabaro, La Ceiba, Parmana, Cuchillo, La Gaviota, Orocopiche, Botalón, Bucare y Mamo.
4. *Islas múltiples en expansiones*: Son las que ocurren en un número mayor de dos en áreas de expansión del cauce. Están asociadas con tramos trenzados del río en donde la dinámica sedimentaria es muy activa y compleja, pudiendo estar controladas por las estructuras geológicas o la litología. Ejemplos de este tipo de islas son: La Urbana, El Infierno, Isla Fajardo y La Ceiba-Ceibita-Isabela.
5. *Islas asociadas a barras alternadas*: Son aquellas que se presentan asociadas con barras alternadas en el canal principal o en el canal lateral. Un ejemplo de este tipo se encuentra en la Isla Matajey.

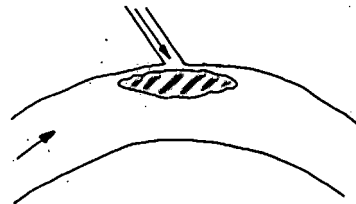
En la Tabla 2 se muestran características geométricas de algunas islas existentes en el tramo medio e inferior en sitios donde se producen expansiones notables del canal. Relaciones entre el ancho máximo de la expansión y los anchos de los canales subdivididos (anabranched), se muestran en las columnas (7) y (8) de dicha tabla. Los valores mostrados en la columna (7), oscilan generalmente en canales naturales en el rango de 1,6 a 2; en el caso de algunas islas del Orinoco los valores son notablemente elevados, con excepción de los encontrados en las islas de La Ceiba, Curva del Infierno y Orocopiche, que indican valores pequeños respecto a los normales.



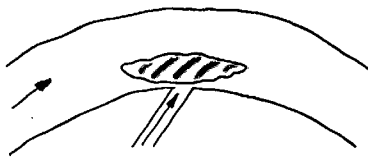
a) Isla central (con o sin canal divisorio)



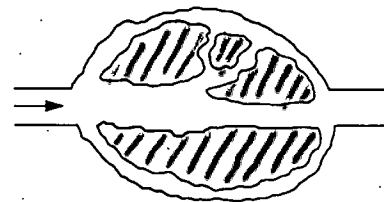
b) Isla en concavidad de tramo recto (con o sin tributario)



c) Isla en concavidad de tramo curvo (con o sin tributario)



d) Isla en convexidad (con o sin tributario)



e) Islas múltiples en zonas de expansión

Figura 5. Islas fluviales identificadas en el tramo medio e inferior del Río Orinoco.

(1) Nombre	(2) be (Km)	(3) bs (Km)	(4) B (Km)	(5) Σ bci (Km)	(6) Σ bci/B	(7) • Σ bci/be	(8) Σ bci/bs
I. Matajey	2.0	2.6	6.4	3.2	0.50	1.60	1.23
La Ceiba	2.6	2.4	8.0	3.0	0.38	1.15	1.25
La Urbana	1.6	1.2	12.0	3.5	0.29	2.19	2.92
I. Tucuragua	2.0	1.8	8.0	4.8	0.60	2.40	2.67
I. Orocopiche	2.6	1.0	6.2	3.8	0.61	1.46	3.80
I. de Mamo	1.2	2.4	8.4	4.0	0.48	3.33	1.67
I. Bucare	1.4	1.2	6.6	3.2	0.48	2.29	2.67
I. Grande o Panapana	1.4	1.4	6.0	3.2	0.53	2.29	2.29
I. Infierno	1.0	1.4	9.0	1.4	0.16	1.40	1.00

Tabla 2. Características geométricas de islas múltiples en zonas de expansión del Río Orinoco en el tramo medio e inferior, según aerofotografías de 1985 (be = ancho del cauce a la entrada; bs = ancho del cauce a la salida; B = ancho de la expansión; bci = ancho de los canales subdivididos).

CONCLUSIONES

El Río Orinoco representa uno de los más importantes sistemas fluviales del planeta con un rango de tercero en magnitud de caudales líquidos y octavo como suministrador de sedimentos al océano. La cuenca posee cualidades específicas en diferentes regiones: El Escudo de Guayana, Los Andes, La Cordillera de la Costa y las llanuras de Colombia y Venezuela, las cuales exhiben variadas características en el clima, geología, relieve, fuente y naturaleza de los materiales de suministro, cubierta vegetal etc.; las múltiples y complejas estructuras fluviales que presenta el río en su extenso trayecto, reflejan estas condiciones.

En la evolución geomorfológica del Río Orinoco y de su planicie fluvial han intervenido procesos de naturaleza geológicos, hidrológicos, paleoclimáticos, de transporte de sedimentos mixtos eólico-fluviales, con intensidades variables en el tiempo. Su consideración permite analizar y describir estas estructuras, así como visualizar la evolución del canal en un contexto histórico.

Desde el punto de vista hidrológico, el Río Orinoco presenta un rendimiento líquido con una magnitud que origina grandes variaciones de su caudal, lo que se refleja en fluctuaciones notables del nivel del agua entre el período seco y lluvioso. Esto afecta extensas áreas de la planicie contribuyendo a formar complejas y diversas estructuras fluvio-morfológicas.

Las relaciones morfométricas evaluadas para la cuenca del Río Orinoco, como de varias sub-cuencas contribuyentes situadas dentro del Escudo y en las llanuras, indican una tendencia general a la elongación similar al comportamiento normal de muchas cuencas. Sin embargo, el área de drenaje necesaria para mantener una longitud unitaria del canal principal, difiere de lo encontrado en otras cuencas.

Las estructuras del canal y de la planicie en el tramo fluvial Río Meta-Río Apure, deben su complejidad en parte al hecho de que se produce un mecanismo de transporte combinado, donde el viento y la acción hidrodinámica del flujo de agua, en algunos sectores del río, actúan alternadamente durante los períodos de aguas bajas y altas, produciendo una removilización y distribución del sedimento.

Numerosas estructuras fluviales como barras e islas, deben su origen a las elevadas magnitudes de materiales suministrados por los tributarios procedentes de los Llanos, los cuales son depositados en las confluencias, desde donde son transportados aguas abajo por el flujo del Orinoco. Diferentes patrones de islas han sido identificados y clasificados, dependiendo sus configuraciones del sector del canal considerado.

Los cálculos de la sinuosidad del canal en el tramo medio e inferior del Orinoco conducen a un valor menor a 1,5, lo cual indica que el cauce del Río Orinoco no clasifica estrictamente como un río sinuoso. Sin embargo, localmente se determinan diversidad de geformas superimpuestas dentro del canal, tales como patrones de tipo trenzado y sinuoso.

REFERENCIAS

Leopold, L., Wolman, M., and Miller, J., 1964. "Fluvial Processes in Geomorphology", W.H. Freeman and Company, San Francisco.

Lane E. W., 1955, " The importance of Fluvial Morphology in Hidraulic Engineering", ASCE, Proc. 81, paper 745, 1-17.

López, J.L. y Pérez Hernández .D., 1998. "Cambios Morfológicos en el Orinoco a través del Tiempo", El Río Orinoco. Aprovechamiento Sustentable, Instituto de Mecánica de Fluidos, UCV, Caracas.

McKee, E., 1989, "Sedimentary Structures and Textures of Rio Orinoco Channel Sands, Venezuela and Colombia. U.S. Geological Survey, Water Supply Paper 2326.

Meade, R. , Nordin C., Pérez Hernández. D., Mejia A, Pérez, G. (1983). "Sediments and Water Discharge of Orinoco , Venezuela and Colombia". Proc. Of II intern. Symp. On river sedimentation, Nanjing China. Pag. 1134-1144.

Nordin, C. y Pérez Hernández D.,1989. "Sand Waves, Bars, and Wind-Blown Sands of the Rio Orinoco, Venezuela and Colombia." U.S. Geological Survey, Water Supply Paper 2326-A.

Pérez Hernández., D., 1989, "Campañas Hidrológicas de Medición en el Orinoco y sus afluentes" Dirección de Hidrología y Meteorología . MARNR.

Pérez, Hernández, D., 1986, "Comportamiento Hidrológico de los Ríos del estado Apure. Transporte Eólico y efectos sobre la vialidad San Fernando Pto. Páez. Dir. De Hidrología y Meteorología. MARNR.

Pérez, Hernández., 1998 "Mediciones Hidrológicas en el Río Orinoco Durante la Creciente anual de 1998", Dir. de Hidrología y Meteorología, MARNR.

Pérez, Hernández. D., 1992, "Procesos Fluviales en las Cuencas de los Ríos Siapa y Mavaca. Amazonía de Venezuela " Dpto . de Ing. Hidr. Escuela de Ing. Civil UCV.

Schumm, S., 1993, " River Response to Base level Change : Implications for sequence Stratigraphy ", Colorado State University, Fort Collins, U.S.A.