

**TESIS DE MAESTRIA**

**ESTUDIO DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA  
EVOLUCIÓN DEL RELIEVE DE LA ZONA CENTRAL DE LA  
CUENCA DEL RÍO ORINOCO ADYACENTE A LOS RÍOS  
MANAPIRE, ZUATA, PAO, CUCHIVERO, ARO Y CAURA  
MEDIANTE MÉTODOS DE GEOMORFOLOGÍA  
CUANTITATIVA**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Ing. Roura Katheuska  
Para optar al Título de  
Magister en Ciencias Geológicas

Caracas, Febrero del 2019

**TESIS DE MAESTRIA**

**ESTUDIO DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA  
EVOLUCIÓN DEL RELIEVE DE LA ZONA CENTRAL DE LA  
CUENCA DEL RÍO ORINOCO ADYACENTE A LOS RÍOS  
MANAPIRE, ZUATA, PAO, CUCHIVERO, ARO Y CAURA  
MEDIANTE MÉTODOS DE GEOMORFOLOGÍA  
CUANTITATIVA**

Tutor académico: Dr. Mauricio Bermúdez

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Ing. Roura Katheuska  
Para optar al Título de  
Magister en Ciencias Geológicas

Caracas, Febrero del 2019



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
COMISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



Comisión de  
Estudios de  
Postgrado

VEREDICTO


Quienes suscriben, miembros del jurado designado por el Consejo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, reunidos para examinar el **Trabajo Grado** presentado por la **ING. KATHEUSKA ROURA**, portadora de la Cédula de Identidad No **V.-18.237.898**, bajo el título "**ESTUDIO DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA EVOLUCIÓN DEL RELIEVE DE LA ZONA CENTRAL DE LA CUENCA DEL RÍO ORINOCO ADYACENTE A LOS RÍOS MANAPIRE, ZUATA, PAO, CUCHIVERO, ARO Y CAURA MEDIANTE MÉTODOS DE GEOMORFOLOGÍA CUANTITATIVA**", a fin de cumplir con el requisito legal para optar al grado académico de Magister en Ciencias Geológicas; dejan constancia de lo siguiente:

1.- Leído como fue dicho trabajo por cada uno de los miembros del jurado, se fijó el día 04 de febrero de 2019, a las 10:00 a.m., para que la autora lo defendiera en forma pública, acto que se realizó en la sala de videoconferencia, ubicada en el edificio de Física, piso 1, en el Centro de Procesamiento de Datos (CPD), mediante un resumen oral de su contenido, luego de lo cual respondió a las preguntas que le fueron formuladas por el jurado, todo ello conforme con lo dispuesto en el Reglamento de Estudios de Postgrado.


2.- Finalizada la defensa del trabajo, el jurado decidió **APROBARLO**, por considerar, sin hacerse solidario con las ideas expuestas por el autor, que el trabajo se ajusta a lo dispuesto y exigido en el Reglamento de Estudios de Postgrado.

Para este veredicto, el Jurado, consideró que la obra examinada representa un enfoque novedoso en el área de análisis de la geomorfología cuantitativa aplicada a un sector de la cuenca del río Orinoco. Finalmente, se reitera que por unanimidad se le asignó la calificación de "**APROBADO**".


En fe de lo cual se levanta la presente ACTA, a los cuatro (04) días del mes de febrero del año 2019, conforme a lo dispuesto en el Reglamento de Estudios de Postgrado, actuó como Coordinador del Jurado el **Dr. Mauricio Bermúdez**.

  
MSc. Orlando Cabrera  
12.115.769

(**JURADO**)  
(Escuela de Geografía, UCV)

  
Dra. Luz Rodríguez  
10.902.202

(**JURADO**)  
(FUNVISIS)

  
Dr. Mauricio A Bermúdez  
12.378.742  
(**TUTOR**)  
(Fac. de Ingeniería, UCV)

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por permitirme vivir un día más y alcanzar esta meta.

A la Universidad Central de Venezuela por abrirme sus puertas y enseñarme muchas cosas dentro y fuera del aula.

A mis padres, especialmente Idelfonso Roura por haber dado esa extra milla necesaria para que lograra este éxito en una sola pieza.

A mi esposo José Quijada por la paciencia y apoyo incondicional al cargar con mi PC por todo el territorio nacional.

A mi tutor Mauricio Bermúdez, por su apoyo permanente, por compartir sus conocimientos conmigo y siempre estar pendiente del buen término de este trabajo de grado. Por todo eso y más, muchísimas Gracias.

Y a todas aquellas personas que con un granito de arena ayudaron a alcanzar esta meta en mi vida.

**MUCHAS GRACIAS**

**Katheuska K., Roura A.**

**ESTUDIO DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA EVOLUCIÓN  
DEL RELIEVE DE LA ZONA CENTRAL DE LA CUENCA DEL RÍO  
ORINOCO ADYACENTE A LOS RÍOS MANAPIRE, ZUATA, PAO,  
CUCHIVERO, ARO Y CAURA MEDIANTE MÉTODOS DE  
GEOMORFOLOGÍA CUANTITATIVA**

**Tutor académico: Dr. Mauricio A Bermúdez. Tesis de Maestría en Ciencias  
Geológicas. Caracas. UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y  
Geofísica. 2018. 200 páginas**

**Palabras Claves: Geomorfología cuantitativa, Perfiles longitudinales de ríos,  
Índice de Hack (SL), Índice de verticalidad (ksn), Integral Hipsométrica, Índices  
de erosión, Dimensión fractal, clima relieve y tectónica, cuenca del río Orinoco**

**RESUMEN**

La presente investigación aborda el estudio y discriminación de los factores que intervienen en el modelado del relieve actual de la zona central de la cuenca del río Orinoco mediante la combinación de métodos de geomorfología cuantitativa con análisis estadísticos. Para lograr este objetivo, a partir de un modelo digital de terreno para la zona de estudio se calculan los atributos primarios y secundarios del terreno, índice de fracturamiento o fallamiento (IF), índice de Hack (SL) y de verticalidad (ksn); relieve a distintos radios y se aplica un análisis de correlación lineal tipo Pearson y un análisis de regresión múltiple para discriminar los posibles factores que pudieran estar controlando el relieve actual dentro de las subcuencas del río Orinoco analizadas.

Los análisis de perfiles de ríos son sensibles a cambios climáticos, tectónicos o la interacción entre estos procesos. Principalmente la migración de puntos de referencia (“knickpoints”) debido a la inflexión o cambios generados en los perfiles de los ríos arroja información que es vital para entender esos procesos. A través de la técnica de análisis de perfiles de ríos o “Stream Profile Analysis” en la presente

investigación se estudiaron los perfiles de los ríos Manapire, Zuata, Pao, Cuchivero, Aro y Caura, todos tributarios del río Orinoco en el sector sur del país.

A pesar de que la superficie que comprenden esas subcuencas es considerable, se observaron diferencias contrastantes en los márgenes norte y sur del río Orinoco. Los perfiles de las cuencas de los ríos Aro, Caura y Cuchivero (Sur) están en desequilibrio, lo que indicaría así un levantamiento superficial, mientras que las cuencas de menor tamaño al norte (Manapire, Pao y Zuata) no presentan un desequilibrio aparente. Los valores calculados de dimensión fractal al ser muy parecidos indican un proceso de autosimilaridad entre las diversas cuencas, es decir, que el relieve estaría siendo controlado por un mismo proceso (tectónico o climático).

Para poder discriminar, cuál de estos procesos es más importante, o si ambos estuvieran trabajando de forma acoplada, se realizó un análisis de correlación de Pearson. Se observó que hay una alta correlación de la precipitación y los índices de erosión con el relieve ( $R^2 = 0,77 \pm 0,01$ ), lo que significa que el clima pareciera ser el factor predominante en el modelado de este. Por su parte, la correlación entre índices de fracturamiento o fallamiento versus el relieve arroja un coeficiente de correlación bajo ( $R^2 = 0,20 \pm 0,02$ ). En contraste, la correlación entre el índice de verticalidad (ksn) y el relieve es moderado con una correlación mediana ( $R^2 = 0,56 \pm 0,02$ ) lo que sugiere que la tectónica tiene un papel secundario en la formación del relieve de esta zona, así mismo se observó una anticorrelación ( $R^2 < 0$ ) entre los índices de humedad versus relieve, y capacidad de transporte con el relieve, esto sugiere que la pendiente no participa activamente en la formación del relieve de esta zona. Finalmente, un análisis de regresión lineal múltiple en donde el clima (representado por las precipitaciones) y la tectónica (representada por el índice de fracturamiento o fallamiento) son variables independientes, y el relieve como variable dependiente refuerzan esta última conclusión. La metodología acá implementada, así como el análisis de perfiles de ríos constituye una contribución de esta tesis, ya que hasta el momento no se habían realizado estudios que involucrarán esta técnica.

## *INDICE*

AGRADECIMIENTOS .....	iv
RESUMEN.....	v
LISTA DE FIGURAS .....	xi
LISTA DE TABLAS .....	xviii
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO I.....	3
FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACION .....	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.2.1 General.....	4
1.2.2 Específicos .....	4
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4 ALCANCE .....	5
1.5 ANTECEDENTES .....	6
CAPITULO II .....	11
GENERALIDADES .....	11
2.1 UBICACIÓN GEOGRAFICA .....	11
2.2 CARACTERISTICAS FISICO – NATURALES .....	12
2.2.1 Relieve .....	12
2.2.2 Suelos.....	14
2.2.3 Climatología.....	14
2.2.4 Hidrografía.....	16
2.3 GEOLOGIA REGIONAL.....	16
2.3.1 Marco Estratigráfico .....	17
2.3.2 Marco Estructural .....	22
2.3.3 Marco Tectonoestratigráfico.....	24
2.3.3.1 Fase de la mega secuencia Prerifting: .....	24
2.3.3.2 Fase de la mega secuencia Rifting .....	24
2.3.3.3 Fase de la mega secuencia del Margen Pasivo.....	24

2.3.3.4 Fase de la mega secuencia de Colisión Oblicua.....	25
2.3.4 Origen de la Formación Mesa.....	25
2.3.4.1 Explicación fluvial: .....	25
2.3.4.2 Explicación deltaica y palustre: .....	26
2.3.4.3 Explicación periglacial:.....	26
2.3.5 Características generales descritas por las principales edades que marcaron importantes eventos geológicos en la Formación Mesa .....	26
2.3.5.1 Pre- Cámbrico .....	26
2.3.5.2 Cámbrico (540- 500 m.a) .....	27
2.3.5.3 Silúrico (440- 360 m.a) .....	28
2.3.5.4 Devónico (415- 360 m.a) .....	28
2.3.5.5 Carbonífero- Pérmico (360- 260 m.a).....	28
2.3.6 Rasgos fisiográficos y geomorfológicos de la provincia de Guayana venezolana y llanos del Orinoco.....	29
2.3.6.1 Plano aluvional del Orinoco y superficie reciente de los llanos de edad reciente – plioceno. ....	29
2.3.6.2 Superficie Caroní – Aro y nivel intermedio edad terciario .....	29
2.3.6.3 Superficie de Imataca de edad Cretácica superior .....	30
2.3.6.4 Superficies de Kamarata de edad desconocida .....	30
CAPITULO III .....	31
MARCO TEÓRICO.....	31
3.1 GEOMORFOLOGÍA CUANTITATIVA .....	31
3.1.2 Análisis Digital del Terreno.....	32
3.1.3 Datos de Elevación Digital Fuentes y Estructuras.....	34
3.1.4 Utilidades de los MED.....	39
3.1.5 Atributos Primarios y Secundarios del Terreno.....	40
3.1.6 Otros cálculos adicionales .....	43
3.1.7 Atributos Morfométricos de las Cuencas Hidrográficas.....	46
3.1.7.1 Para el presente estudio se tomaron en cuenta los siguientes factores (Figueira y Romero, 2014): .....	46
3.1.7.2 Características que definen la forma .....	46



3.1.8 Perfiles longitudinales.....	50
3.1.9 Análisis Hipsométrico.....	53
CAPITULO IV .....	55
METODOLOGÍA .....	55
4.1 RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y CARTOGRÁFICA.....	56
4.2 GENERACIÓN Y CORRECCIÓN DEL MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL (MED) .....	57
4.2.1 Corrección del MED (relleno o "fill") .....	57
4.3 OBTENCIÓN DEL PERFIL LONGITUDINAL DE LOS RÍOS TRIBUTARIOS.....	58
4.3.1 Análisis hipsométrico .....	61
4.4 OBTENCIÓN DE LOS INDICES “STREAM – GRADIENT INDEX (SL)”	63
4.5 CALCULAR ATRIBUTOS PRIMARIOS Y SECUNDARIOS .....	65
4.6 MAPAS DE ÍNDICES DE EROSIÓN .....	65
4.6.1 Índices de erosión .....	66
4.6.1.1 Poder de flujo total (TSP) .....	67
4.6.1.2 Poder de flujo unitario (USP).....	67
4.6.1.3 Poder de flujo de cizalla (SSP).....	67
4.6.2 Herramientas para el cálculo en ARCGIS10.3. ....	68
4.6.3 Herramientas para una Visualización Óptima .....	68
4.6.4 Erosión y Dimensión fractal .....	69
4.7 INDICE DE FRACTURAMIENTO .....	71
4.8 INTERACCIÓN ENTRE EL RELIEVE ACTUAL Y LA GEOMORFOLOGÍA DE LAS CUENCAS ANALIZADAS.....	72
CAPITULO V .....	73
RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS .....	73
5.1 DEFINICION DE RELIEVE MEDIANTE MODELO DE ELEVACION DIGITAL (MED) .....	73
5.2 EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA TECTÓNICA EN EL RELIEVE A PARTIR DE PERFILES LONGITUDINALES DE LOS RÍOS.....	79
5.2.1 Análisis Hipsométrico.....	102

5.2.1.1 Río Aro.....	102
5.2.1.2 Río Caura .....	103
5.2.1.3 Río Cuchivero .....	104
5.2.1.4 Río Pao .....	104
5.2.1.5 Río Manapire.....	105
5.2.1.6 Río Zuata.....	106
5.3 ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE GRADIENTE DE FLUJO SL .....	107
5.4 CLASIFICACION FORMAL DE LA SUPERFICIE DEL AREA DE ESTUDIO MEDIANTE ANÁLISIS DE ATRIBUTOS DEL TERRENO.....	112
5.4.1 Atributos primarios .....	112
5.4.1.1 Otros Aspectos Morfométricos de la cuenca .....	117
5.4.2 Atributos Secundarios.....	119
5.5 ÍNDICES DE EROSIÓN CONSIDERANDO LA PRECIPITACIÓN VARIABLE.....	132
5.5.1 Calculo de la erosión y Dimensión fractal.....	142
5.6 INDICE DE FALLAMIENTO.....	143
5.7 ANALISIS DE LAS INTERACCIONES ENTRE CLIMA, RELIEVE Y TECTONICA MEDIANTE ANALISI DE CORRELACION LINEAL (PEARSON) Y REGRESION LINEAL MULTIPLE.....	145
5.8 ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN ENTRE EL RELIEVE ACTUAL Y LA GEOMORFOLOGÍA DE LAS CUENCAS.....	149
CONCLUSIONES .....	162
RECOMENDACIONES .....	164
BIBLIOGRAFÍA .....	165
APÉNDICES.....	169

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Ubicación área de estudio (tomado de google earth) .....	11
<b>Figura 2.2</b> Cuenca del río Orinoco. Región de los llanos sur Orientales. Mostrando los ríos que se trabajaran al norte (Manapire, Zuata y Pao). (Base de datos Ingeomin) .....	12
<b>Figura 2.3</b> Cuenca del río Orinoco. Región alto Orinoco – Región Orinoco sur. Mostrando los ríos que se trabajaran al sur (Cuchivero, Caura y Aro). (Base de datos Ingeomin) .....	13
<b>Figura 2.4</b> Tasa de precipitación anual promedio para el área de estudio (Tomado y modificado de <a href="http://www.venemia.com">www.venemia.com</a> ). .....	15
<b>Figura 2.5</b> Tipos climáticos de Venezuela según Thornwaite, pisos térmicos (Tomado y modificado de <a href="http://www.venemia.com">www.venemia.com</a> ). .....	16
<b>Figura 2.6</b> Mapa geológico de Venezuela con las cuencas de interés superpuestas (Modificado de Hackley et al., 2006). .....	17
<b>Figura 2.7</b> Estratos conglomeráticos de la Formación Mesa (LEV, 2010). .....	18
<b>Figura 2.8</b> Área de afloramiento de las formaciones en la Cuenca Oriental (Tomado de: González de Juana, et al., 1980). .....	18
<b>Figura 2.9</b> Cuadro Carta estratigráfica regional simplificada mostrando la edad y configuración tectónica de las cuencas internas y costa afuera. Nótese la diferencia de edades entre las cuencas foreland del oeste (Paleógenas) y las del este (Neógenas) esto se debe al movimiento de la Placa del Caribe. Costa afuera las diferentes cuencas no siguen el mismo patrón de deformación como las cuencas internas con una fase extensional durante el Eoceno–Oligoceno seguido por una inversión Miocena medio. La única cuenca interior que no sigue el patrón de las cuencas antepaís es la cuenca de Falcón cuya evolución es similar a las de costa afuera (Escalona y Mann, 2011). .....	20
<b>Figura 2.10</b> a) Columna estratigráfica y b) Corte Geológico de la Cuenca Oriente (Yoris y Ostos, 1997). .....	21
<b>Figura 2.11</b> Mapa gravimétrico de Bouguer de la cuenca Oriental de Venezuela (Pratsch, 1994). .....	21
<b>Figura 2.12</b> Corte geológico representando estructuras expuestas al norte del río Orinoco (Tomado de: Yoris y Ostos, 1997). .....	22
<b>Figura 2.13</b> Aspectos generales relacionados con la tectónica, geología estructural y superficial del delta del Orinoco. (Yoris y Ostos, 1997). .....	23

<b>Figura 2.14</b> Modelo de evolución geológico (Ramirez, 1982). .....	27
<b>Figura 2.15</b> Cambio en los patrones paleogeográficos a finales de la Era Proterozoica y principios del Paleozoica (Stanley, 1999). .....	27
<b>Figura 3.1</b> Escalas en la que varios procesos biofísicos dominan el cálculo primario de regímenes ambientales. (Tomado de Mackey 1996 en Wilson y Gallant, 2000)..	33
<b>Figura 3.2</b> Estructura de las redes de datos: a) regular de la red, b) una red irregular triangular c) Red basada en el contorno (Tomado de Moore, Grayson y Ladson, 1991 en Wilson y Gallant, 2000). .....	37
<b>Figura 3.3</b> Diferentes tipos de MED generados de acuerdo a la filosofía de muestreo de los datos de elevación digital (Arcia y Viana, 2013) .....	38
<b>Figura 3.4</b> (a) Mapa de curvas de nivel (contornos), (b) MED derivado de las curvas de nivel, (c) Modelo TIN derivado de las curvas de nivel, (d) modelo derivado de las curvas de nivel, en perspectiva (Tomado y modificado de página web del Dr. ShunjiMurai, <a href="http://cret.cnu.edu.cn/syjsx/content/giswb/vol2/contents.htm">http://cret.cnu.edu.cn/syjsx/content/giswb/vol2/contents.htm</a> en Arcia y Viana, 2013).....	39
<b>Figura 3.5</b> Modelos de atributos de terrenos calculados a partir del MED. (Tomado y modificado de página web del Dr. ShunjiMurai, <a href="http://cret.cnu.edu.cn/syjsx/content/giswb/vol2/contents.htm">http://cret.cnu.edu.cn/syjsx/content/giswb/vol2/contents.htm</a> en Arcia y Viana, 2013) .....	40
<b>Tabla 3.6</b> Valores del factor forma (Fuentes, J. 2004).....	49
<b>Tabla 3.7.</b> Clasificación de una cuenca en función de su coeficiente de masividad. (Figueira y Romero, 2014). .....	50
<b>Figura 3.8</b> Método de análisis hipsométrico. (Strahler, 1954a. p.353 en Strahler, 1957) .....	54
<b>Figura 4.1</b> Flujograma de actividades .....	56
<b>Figura 4.2</b> Las principales tareas asociadas con el modelado del terreno digital. (Wilson y Gallant, 2000).....	57
<b>Figura 4.3</b> Pasos para crear los archivos .txt en ArcGIS .....	59
<b>Figura 4.4</b> Herramienta Profiler toolbar en ArcGIS .....	59
<b>Figura 4.5</b> Pasos para la creación de mapa ksn con topo toolbox.....	61
<b>Figura 4.6</b> Clasificación de una cuenca en base a su curva hipsométrica.....	62
<b>Figura 4.7</b> Esquema mostrando el cálculo del índice SL (Etchebere et al., 2006 en Monteiro et al, 2010).....	64

<b>Figura 4.8.</b> Calculadora de Raster que cuenta el software ArcGIS 10.3.....	68
<b>Figura 4.9.</b> Comparación visual entre el índice de erosión USP para la cuenca del río Cuchivero: a) Sin aplicar la herramienta "focal statistics"; b) Aplicando la herramienta "focal statistics" con una geometría del entorno circular, con radio de 10 km.....	69
<b>Figura 5.1</b> Modelo de elevación digital de la cuenca del río Aro. a) DEM b) TIN c) Mapa Litológico d) Relieve 10km e) Relieve 20km f) Relieve 50km.....	74
<b>Figura 5.2</b> modelo de elevación digital de la cuenca del río Caura. a) DEM b) TIN c) Mapa Litológico d) Relieve 10km e) Relieve 20km f) Relieve 50km.....	75
<b>Figura 5.3</b> Modelo de elevación digital de la cuenca del río Cuchivero. a) DEM b) TIN c) Mapa Litológico d) Relieve 10km e) Relieve 20km f) Relieve 50km .....	76
<b>Figura 5.4</b> Modelo de elevación digital de la cuenca del río Pao. a) DEM b) TIN c) Mapa Litológico d) Relieve 10km e) Relieve 20km f) Relieve 50km.....	77
<b>Figura 5.5</b> Modelo de elevación digital de la cuenca del río Manapire. a) DEM b) TIN c) Mapa Litológico d) Relieve 10km e) Relieve 20km f) Relieve 50km .....	78
<b>Figura 5.6</b> Modelo de elevación digital de la cuenca del río Zuata. a) DEM b) TIN c) Mapa Litológico d) Relieve 10km e) Relieve 20km f) Relieve 50km.....	79
<b>Figura 5.7.</b> a) Perfil longitudinal. b) perfil área de drenaje/distancia. c) perfil gradiente/área de drenaje,.....	82
<b>Figura 5.8.</b> a) Perfil elevación /chi. b) gradiente/distancia. c) ksn/distancia. ....	83
<b>Figura 5.9</b> a) Perfil longitudinal. b) perfil área de drenaje/distancia. c) Perfil gradiente/área de drenaje,.....	85
<b>Figura 5.10</b> a) Perfil elevación /chi. b) gradiente/distancia. c) ksn/distancia. ....	86
<b>Figura 5.11</b> a) Perfil longitudinal. b) perfil área de drenaje/distancia. c) Perfil gradiente/área de drenaje,.....	88
<b>Figura 5.12</b> a) Perfil elevación /chi. b) gradiente/distancia. c) ksn/distancia. ....	89
<b>Figura 5.13</b> a) Perfil longitudinal. b) perfil área de drenaje/distancia. c) Perfil gradiente/área de drenaje,.....	91
<b>Figura 5.14.</b> a) Perfil elevación /chi. b) gradiente/distancia. c) ksn/distancia. ....	92
<b>Figura 5.15</b> a) Perfil longitudinal. b) perfil área de drenaje/distancia. c) Perfil gradiente/área de drenaje,.....	94
<b>Figura 5.16.</b> a) Perfil elevación /chi. b) gradiente/distancia. c) ksn/distancia. ....	95

<b>Figura 5.17</b> a) Perfil longitudinal. b) perfil área de drenaje/distancia. c) Perfil gradiente/área de drenaje,.....	97
<b>Figura 5.18</b> a) Perfil elevación /chi. b) gradiente/distancia. c) ksn/distancia. ....	98
<b>Figura 5.19</b> Valor ksn del río Aro .....	99
<b>Figura 5.20</b> Valor ksn del río Caura.....	100
<b>Figura 5.21</b> Valor ksn del río Cuchivero .....	100
<b>Figura 5.22</b> Valor ksn del río Manapire.....	101
<b>Figura 5.23</b> Valor ksn del río Pao .....	101
<b>Figura 5.24</b> Valor ksn del río Zuata .....	102
<b>Figura 5.25</b> Curva Hipsométrica de la cuenca del río Aro.....	103
<b>Figura 5.26</b> Curva Hipsométrica de la cuenca del río Caura .....	103
<b>Figura 5.27</b> Curva Hipsométrica de la cuenca del río Cuchivero .....	104
<b>Figura 5.28</b> Curva Hipsométrica de la cuenca del río Pao.....	105
<b>Figura 5.29</b> Curva Hipsométrica de la cuenca del río Manapire .....	105
<b>Figura 5.30</b> curva hipsométrica de la cuenca del río Zuata .....	106
<b>Figura 5.31.</b> Índices SL anómalos del río Aro .....	108
<b>Figura 5.32.</b> Índices SL anómalos del río Caura.....	109
<b>Figura 5.33.</b> Índices SL anómalos del río Cuchivero.....	109
<b>Figura 5.34.</b> Índices SL anómalos del río Manapire .....	110
<b>Figura 5.35.</b> Índices SL anómalos del río Pao .....	111
<b>Figura 5.36.</b> Índices SL anómalos del río Zuata .....	111
<b>Figura 5.37</b> Mapa de la cuenca del río Aro. a) Mapa de Elevación b) Mapa de pendiente .....	112
<b>Figura 5.38</b> Mapa de la cuenca del río Caura. a) Mapa de Elevación b) Mapa de pendiente c) Relieve 10km d) Relieve 20km e) Relieve 50km.....	113
<b>Figura 5.39</b> Mapa de la cuenca del río Cuchivero. a) Mapa de Elevación b) Mapa de pendiente .....	114
<b>Figura 5.40</b> Mapa de la cuenca del río Pao. a) Mapa de Elevación b) Mapa de pendiente .....	115
<b>Figura 5.41</b> Mapa de la cuenca del río Manapire. a) Mapa de Elevación b) Mapa de pendiente .....	116

<b>Figura 5.42</b> Mapa de la cuenca del río Zuata. a) Mapa de Elevación b) Mapa de pendiente .....	117
<b>Figura 5.43</b> Atributos secundarios río Aro a) Índice de Humedad (WI) b) índice de potencia de flujo (SPI) c) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) d) índice topográfico compuesto (CTI) .....	121
<b>Figura 5.44</b> Atributos secundarios río Caura a) Índice de Humedad (WI) b) índice de potencia de flujo (SPI) c) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) d) índice topográfico compuesto (CTI) .....	123
<b>Figura 5.45</b> Atributos secundarios río Cuchivero a) Índice de Humedad (WI) b) índice de potencia de flujo (SPI) c) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) d) índice topográfico compuesto (CTI) .....	125
<b>Figura 5.46</b> Atributos secundarios río Pao a) Índice de Humedad (WI) b) índice de potencia de flujo (SPI) c) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) d) índice topográfico compuesto (CTI) .....	127
<b>Figura 5.47</b> Atributos secundarios río Manapire a) Índice de Humedad (WI) b) índice de potencia de flujo (SPI) c) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) d) índice topográfico compuesto (CTI) .....	129
<b>Figura 5.48</b> Atributos secundarios río Zuata a) Índice de Humedad (WI) b) índice de potencia de flujo (SPI) c) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) d) índice topográfico compuesto (CTI) .....	131
<b>Figura 5.49</b> Mapas de las precipitaciones TRMM para los años 1998 – 2009 de las cuencas de la zona central del río Orinoco (Tomado de <a href="http://www.geog.ucsb.edu/~bodo/TRMM/">http://www.geog.ucsb.edu/~bodo/TRMM/</a> ).....	133
<b>Figura 5.50</b> Mapas de índices de erosión del río Aro a) TSP b) USP c) SSP d) TSPP e) USPP f) SSPP .....	134
<b>Figura 5.51</b> Mapas de índices de erosión del río Caura a) TSP b) USP c) SSP d) TSPP e) USPP f) SSPP .....	135
<b>Figura 5.52</b> Mapas de índices de erosión del río Cuchivero a) TSP b) USP c) SSP d) TSPP e) USPP f) SSPP .....	137
<b>Figura 5.53</b> Mapas de índices de erosión del río Pao a) TSP b) USP c) SSP d) TSPP e) USPP f) SSPP .....	138
<b>Figura 5.54</b> Mapas de índices de erosión del río Manapire a) TSP b) USP c) SSP d) TSPP e) USPP f) SSPP .....	139
<b>Figura 5.55</b> Mapas de índices de erosión del río Zuata a) TSP b) USP c) SSP d) TSPP e) USPP f) SSPP .....	140

<b>Figura 5.56</b> Grafica de TSP y TSPP promedio normalizados.....	141
<b>Figura 5.57</b> Grafica de USP y USPP promedio normalizados.....	142
<b>Figura 5.58</b> Grafica de SSP y SSPP promedio normalizados .....	142
<b>Figura 5.59</b> dimensión fractal de las diferentes subcuencas que se encuentran en la zona central del río Orinoco hacia el sur y hacia el norte del mismo .....	143
<b>Figura 5.60</b> Mapa Geológico de la zona central de la cuenca del río Orinoco .....	144
<b>Figura 5.61</b> Comparación entre la precipitación y el relieve para los diferentes radios. En esta Figura los círculos con el río Pao, los triángulos el río Zuata, los rombos el río Manapire, los cuadrados el río Cuchivero, los asterisco el río Aro y el signo positivo el río Caura.....	148
<b>Figura 5.62</b> Litología de las subcuencas .....	149
<b>Figura 5.63</b> Comparación de a) área, b) perímetro, c) longitud de las cuencas y d) longitud del cauce .....	150
<b>Figura 5.64</b> Comparación entre las elevaciones de las diferentes subcuencas .....	151
<b>Figura 5.65</b> Comparación entre las pendientes de las diferentes subcuencas.....	151
<b>Figura 5.66</b> Comparación entre los índices de: a) Km, b) Kc y c) Kf de todas las cuencas .....	152
<b>Figura 5.67</b> Relación entre el perfil longitudinal, litología, curva hipsométrica, sismicidad, valor del índice de verticalidad y el índice SL.....	153
<b>Figura 5.68</b> Relación de cómo afectan los índices de erosión con precipitaciones en los knickpoints identificados.....	154
<b>Figura 5.69</b> Relación entre el perfil longitudinal, litología, curva hipsométrica, sismicidad, valor del índice de verticalidad y el índice SL.....	155
<b>Figura 5.70</b> Relación de cómo afectan los índices de erosión con precipitaciones en los knickpoints identificados.....	156
<b>Figura 5.71</b> Relación entre el perfil longitudinal, litología, curva hipsométrica, sismicidad, valor del índice de verticalidad y el índice SL.....	157
<b>Figura 5.72</b> Relación de cómo afectan los índices de erosión con precipitaciones en los knickpoints identificados.....	157
<b>Figura 5.73</b> Relación entre el perfil longitudinal, litología, curva hipsométrica, sismicidad, valor del índice de verticalidad y el índice SL.....	158
<b>Figura 5.74</b> Relación de cómo afectan los índices de erosión con precipitaciones en los knickpoints identificados.....	159



<b>Figura 5.75</b> Relación entre el perfil longitudinal, litología, curva hipsométrica, sismicidad, valor del índice de verticalidad y el índice SL.....	159
<b>Figura 5.76</b> Relación de cómo afectan los índices de erosión con precipitaciones en los knickpoints identificados.....	160
<b>Figura 5.77</b> Relación entre el perfil longitudinal, litología, curva hipsométrica, sismicidad, valor del índice de verticalidad y el índice SL.....	160
<b>Figura 5.78</b> Relación de cómo afectan los índices de erosión con precipitaciones en los knickpoints identificados.....	161

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 3.1</b> Atributos Topográficos Primarios que pueden ser calculados por El Análisis de Terreno de los Datos (Dem). Tomado de Moore, Grayson y Ladson (1991). (Wilson y Gallant, 2000) .....	42
<b>Tabla 3.2</b> Características topográficas secundarias que puede ser calculado mediante el análisis digital del terreno a partir del modelo de elevación digital (MED) (Moore, Grayson y Ladson, 1991 en Wilson y Gallant, 2000) .....	43
<b>Tabla 3.3</b> Cálculos de variables y parámetros morfométricos de la microcuenca y la red de drenaje. (Tomado de Gardiner, 1981; Gregory y Walling, 1973; Guevara y Cartaya, 1991; Henao, 1998; Horton,m 1945; Leopold et al., 1964; Monsalve, 2000; Pastrana, 2003; Pérez, 1977; Senciales, 1998; Smith y Stopp, 1978; Strahler, 1968; Strahler, 1985 en Arcia y Viana, 2013).....	45
<b>Tabla 3.4.</b> Clasificación de las cuencas de acuerdo a su extensión superficial (tomado de DOMÍNGUEZ- CORTÁZAR, 2003 en Figueira y Romero, 2014) .....	47
<b>Tabla 3.5.</b> Valores de Índice de Capacidad (tomado de MÁRMOL, L. 2008 en Figueira y Romero, 2014) .....	48
<b>Tabla 4.1</b> Clasificación anomalía del índice de drenaje.....	65
<b>Tabla 5.1</b> valores del Relieve del río Aro, Caura, Cuchivero, Pao, Manapire y zuata .....	73
<b>Tabla 5.2</b> resultados de los valores anómalos SL de los Ríos analizados. En verde: no hay anomalías, en amarillo: anomalías de 2 <sup>do</sup> orden y en rojo: anomalías de 1 <sup>er</sup> orden. ....	107
<b>Tabla 5.3</b> atributos primarios calculados para la cuenca del río Aro .....	112
<b>Tabla 5.4</b> Atributos primarios calculados para la cuenca del río Caura.....	113
<b>Tabla 5.5</b> Atributos primarios calculados para la cuenca del río Cuchivero.....	113
<b>Tabla 5.6</b> Atributos primarios calculados para la cuenca del río Pao .....	114
<b>Tabla 5.7</b> Atributos primarios calculados para la cuenca del río Manapire .....	115
<b>Tabla 5.8</b> Atributos primarios calculados para la cuenca del río Zuata .....	116
<b>Tabla 5.9</b> Valores Morfométricos de la cuenca Aro .....	117
<b>Tabla 5.10</b> Valores Morfométricos de la cuenca Caura .....	118
<b>Tabla 5.11</b> Valores Morfométricos de la cuenca Cuchivero .....	118
<b>Tabla 5.12</b> Valores Morfométricos de la cuenca Pao.....	118

<b>Tabla 5.13</b> Valores Morfométricos de la cuenca Manapire .....	118
<b>Tabla 5.14</b> Valores Morfométricos de la cuenca Zuata .....	119
<b>Tabla 5.15</b> atributos secundario del río Caura. Índice de Humedad (WI) índice de potencia de flujo (SPI) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) índice topográfico compuesto (CTI).....	120
<b>Tabla 5.16</b> atributos secundario del río Caura. Índice de Humedad (WI) índice de potencia de flujo (SPI) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) índice topográfico compuesto (CTI).....	122
<b>Tabla 5.17</b> atributos secundario del río Cuchivero. Índice de Humedad (WI) índice de potencia de flujo (SPI) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) índice topográfico compuesto (CTI).....	124
<b>Tabla 5.18</b> atributos secundario del río Pao. Índice de Humedad (WI) índice de potencia de flujo (SPI) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) índice topográfico compuesto (CTI).....	126
<b>Tabla 5.19</b> atributos secundario del río Manapire. Índice de Humedad (WI) índice de potencia de flujo (SPI) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) índice topográfico compuesto (CTI).....	128
<b>Tabla 5.20</b> atributos secundario del río Zuata. Índice de Humedad (WI) índice de potencia de flujo (SPI) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) índice topográfico compuesto (CTI).....	130
<b>Tabla 5.21</b> Datos de precipitación TRMM año 1998 – 2009.....	132
<b>Tabla 5.22</b> Resultados de índices de erosión del río Aro. TSP, USP, SSP. ....	133
<b>Tabla 5.23</b> Resultados de índices de erosión del río Caura. TSP, USP, SSP.....	135
<b>Tabla 5.24</b> Resultados de índices de erosión del río Cuchivero. TSP, USP, SSP..	136
<b>Tabla 5.25</b> Resultados de índices de erosión del río Pao. TSP, USP, SSP .....	137
<b>Tabla 5.26</b> Resultados de índices de erosión del río Manapire. TSP, USP, SSP....	138
<b>Tabla 5.27</b> Resultados de índices de erosión del río Zuata TSP, USP, SSP .....	140
<b>Tabla 5.28</b> Promedio de los Índices de Erosión normalizados .....	141
<b>Tabla 5.29</b> Resultados del cálculo de dimensión fractal de las subcuencas.....	142
<b>Tabla 5.30</b> Parámetros promedio obtenidos para cada una de las cuencas en estudio .....	145
<b>Tabla 5.31</b> Valores de coeficiente de correlación de Pearson para cada uno de los parámetros mostrados en la Tabla 5.30.....	145

<b>Tabla 5.32</b> Correlación múltiple con el relieve 10km.....	146
<b>Tabla 5.33</b> Correlación múltiple con el relieve 20km.....	146
<b>Tabla 5.34</b> Correlación múltiple con el relieve 50km.....	147

## INTRODUCCIÓN

La geomorfología es el estudio sistemático del relieve terrestre. Según Wilson y Gallant (2000), desde finales del siglo XIX hasta la última década del siglo XX esta rama de la geología pasó de ser una ciencia meramente descriptiva a cuantitativa, lo cual ha facilitado su integración con otras ramas de la ciencias de la tierra como: edafología, mecánica de suelos, geología aplicada, neotectónica, sísmica, termocronología, geofísica, glaciología, climatología, entre otras. Hasta el momento son muy pocos los estudios de aplicaciones de la geomorfología cuantitativa en el sector sur de Venezuela donde grandes extensiones de basamento se encuentran hoy en día siendo sometidas a efectos de la erosión climática, es por esta razón que en el trabajo se plantea utilizar métodos computarizados para el análisis digital del terreno que permitan abarcar grandes cantidades de datos y áreas extensas, como las existentes en el cratón de Guayana.

A medida que las computadoras incrementan su velocidad y memoria los modelos numéricos tienen cada vez más capacidad de manipular la complejidad del mundo real discretizando espacio y tiempo en celdas más pequeñas y en ciclos más breves. Este tipo de modelos apuntan a entender en un sentido cuantitativo las conexiones entre los procesos interactuantes. (Clima, erosión, tectónica, actividades antrópicas, entre otras). Una serie de gráficos resultantes permiten visualizar cómo una sierra, escarpe o un canal evolucionan bajo una serie de condiciones preestablecidas. Dado que los resultados obtenidos deben ser comparados con mediciones en la naturaleza, los modelos han impulsado la determinación de tasas de los procesos actuantes en el terreno, y han establecido preguntas que generan nuevas líneas de investigación y nuevos métodos en geomorfología combinadas con técnicas de datación en superficie. Por otra parte, al introducir el conocimiento previo acerca de procesos superficiales y tectónicos para analizar un modelo, se puede determinar dónde estos procesos convergen, o si uno de ellos resulta defectuoso o débil, en el control de la topografía actual, y hacia qué tópico deberían enfocarse nuevos esfuerzos de investigación (Burbank y Anderson, 2000 en García, 2010).

Básicamente este estudio en este trabajo se toma cómo área de estudio tributarios al norte y al sur de la zona central del río Orinoco (Cuchivero, Aro, y Caura al sur; Manapire, Zuata y Pao al norte) para la comparación de sus atributos y así estudiar los rasgos geomorfológicos que pudieran guardar relación con el clima, la litología y la tectónica prevaleciente en la zona.

# CAPITULO I

## FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACION

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La evolución del relieve actual es producto de la interacción del clima, litología y tectónica presente, y actividades antropicas, la forma en que estos factores intervienen puede ser estudiada mediante análisis digital del terreno. Métodos contemplados en esos análisis son denominados métodos de geomorfología cuantitativa, esta técnica ha sido poco utilizada en estudios del relieve terrestre y es muy útil a la hora de estudiar gran cantidad de área y combinar datos climáticos, geológicos, entre otros.

Los métodos geomorfológicos fluviales cuantitativos empleados en el estudio de la región de montañas constituyen un sistema práctico para delimitar regiones con activo o discriminar zonas en donde el clima predomina como agente controlador del paisaje actual que las montañas exhiben.

Por la cantidad de sedimentos transportados, la distancia recorrida, y la gran red de tributarios que lo conforman el río Orinoco es considerado la principal red fluvial del territorio venezolano, el segundo en Sudamérica y el tercero en el mundo. Su cuenca hidrográfica de aproximadamente 989000 km<sup>2</sup>, transporta material erosionado de diversas cadenas montañosas como: el flanco este de la Cordillera Oriental de Colombia, el flanco sur de Los Andes de Venezuela, La Serranía del Interior y el cratón de Guayana, así los diversos tributarios que lo conforman además de transportar los sedimentos, también produciría erosión en los cauces principales de los mismos, por esta razón en la presente investigación se analizan los factores que intervienen en la evolución del relieve de la zona central de la cuenca del río Orinoco adyacente a los ríos Manapire, Zuata, Pao, Cuchivero, Aro y Caura mediante métodos de geomorfología cuantitativa.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 General**

Estudiar los factores que intervienen en la evolución del relieve de la zona central de la cuenca del río Orinoco adyacente a los ríos Manapire, Zuata, Pao, Cuchivero, Aro y Caura mediante métodos de geomorfología cuantitativa.

### **1.2.2 Específicos**

- a) Definir la forma del relieve mediante la generación y análisis del Modelo de Elevación Digital a una resolución de 30 metros
- b) Evaluar la influencia tectónica en el relieve a partir de perfiles longitudinales de los ríos tributarios de la zona central de la cuenca del río Orinoco
- c) Evaluar la influencia de la litología en el relieve a través del cálculo de “Stream Length - Gradient Index” (SL)
- d) Clasificar formalmente la superficie de la zona central de la cuenca del río Orinoco mediante el cálculo de los atributos topográficos primarios y secundarios del terreno
- e) Realizar mapas de índices de erosión tomando en cuenta el patrón de precipitación de cada Subcuenca de los tributarios de la zona central de la cuenca del río Orinoco
- f) Analizar la interacción entre el relieve actual y la geomorfología de las cuencas analizadas a partir de las características de las Subcuencas de los tributarios de la zona central de la cuenca del río Orinoco

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

La competición no relacionada entre procesos tectónicos que tienden a construir topografía y procesos superficiales a destruirla, representan el núcleo de la geomorfología tectónica (Burbank y Anderson, 2001). En cualquiera investigación sobre la evolución de la superficie terrestre las principales preguntas de investigación que se realizan son: ¿porqué tiene la forma que tiene y que fuerzas son responsables



para esa forma? Por más de un siglo, esta curiosidad natural ha inspirado numerosos modelos conceptuales de evolución del paisaje bajo variados regímenes tectónicos y climáticos. (Burbank y Anderson, 2001)

Progresivamente los métodos cuantitativos de análisis se han ido imponiendo a los estudios descriptivos, bastante subjetivos y difícilmente comparables, debido a los diferentes criterios y diferencias de cada autor. Esta forma de análisis supone una mejora en la sistematización de la descripción y clasificación de cuencas de diferentes características y dimensiones, además de facilitar su comparación, aspectos estos de gran interés en materia de ordenamiento territorial, estudios catastrales, en la cartografía de riesgos de inundación y riesgos asociados y, también como estudios previos a la construcción de represas. (Cobos et al., 2004)

Este trabajo pretende estudiar los principales factores que influyen en la evolución del terreno de la zona central de la cuenca del río Orinoco, mediante el estudio detallado de las subcuenca de los tributarios que tiene al norte y al sur del río, todo mediante análisis digital del terreno. Siendo que el río Orinoco es el mayor río venezolano, el segundo en Sudamérica y el tercero en el mundo, la información que mediante este trabajo se obtendrá es vital para la evaluación de riesgos, planificación urbanística, factores sociales, biodiversidad, ingeniería, uso de tierra, entre otros. Esta metodología facilita la adquisición de esta información por un menor costo, y a pesar de ser poco utilizada es de valiosa importancia para realizar estudios que cuentan con una gran cantidad de datos y áreas extensas, estableciéndose como una excelente técnica que merece ser considerada para futuras investigaciones.

#### **1.4 ALCANCE**

Este estudio sólo se concentro en la zona central de la cuenca, analizando los diferentes ríos tributarios que tiene al norte y al sur, entre ellos estarán El Cuchivero, Caura, Aro al sur; Manapire, Zuata y Pao al norte. Cada una de estas subcuencas apporto información acerca de la tectónica, clima y litología que influyen la evolución del relieve en esta zona.

## 1.5 ANTECEDENTES

Arcia y Viana (2013). “Estudio de la interacción clima, tectónica y procesos superficiales como agentes controladores del relieve actual en terrenos adyacentes a los ríos Nirgua, Boconó y Apure mediante caracterización mineralógica, análisis digital del terreno y estudio de minerales pesados” en el citado trabajo, se utilizaron los fundamentos de geomorfología cuantitativa, es decir, los mismos principios de la geomorfología pero ahora tomando en cuenta la cuantificación de las diferentes variables, a partir de cálculos estadísticos-matemáticos sobre modelos de elevación digital, junto con análisis visual y computarizado de minerales pesados, estudios granulométricos por difracción láser, microscopía electrónica de barrido, análisis petrográficos, difracción de rayos X a un conjunto de 7 muestras de sedimentos modernos pertenecientes a los ríos Nirgua o Buría, Boconó y Apure; y a 4 muestras in-situ seleccionadas en la zona de estudio. Los resultados allí obtenidos muestran lo siguiente: en cuanto al análisis granulométrico vía láser (Master Sizer 2000) se deduce que todas las muestras presentan fuerte asimetría ( $S_k$ ) hacia los finos y la curtosis ( $K$ ) para cada río fue una curva normal o mesocurtica. En contraste el escogimiento ( $S_o$ ) para Apure, Nirgua y Tucuragua, son pobremente escogidos, mientras que los ríos Boconó, Peña y tributario Cojedes son muy mal escogidos. El análisis petrográfico de las muestras Las Palmas 1 y Las Palmas 5, ubicadas en la parte alta de la cuenca del río Cojedes, sugieren que éstas provienen de un metamorfismo de contacto, con una textura lepidoporfídica, y una mineralogía fuertemente alterada. El análisis petrográfico sobre las muestras in-situ ubicada cerca de la falla de Boconó (MIBF) indica alteración de una roca metamórfica tipo mármol, con abundantes microfracturas y recristalización de minerales.

Albornoz y Lezama (2014) en su trabajo “Comparación de la relación topografía-clima-tectónica en el sector suroeste de la cuenca del río Orinoco mediante análisis de índices de erosión y minerales pesados” en la citada investigación se estudia la relación topografía-clima-tectónica de una zona ubicada al suroeste del estado Bolívar comprendida por los ríos Parguaza, Meta, Cataniapo, un segmento del Orinoco y la duna de Santos Luzardo. Para esa investigación se recolectaron cinco (5)

muestras de sedimentos recientes no consolidados que llevaban consigo un número considerable de minerales pesados procedentes de diversas fuentes, se utilizó un microscopio de luz polarizada para la descripción morfo- textural y un microscopio electrónico de barrido para el análisis de composición química de minerales pesados, estos análisis fueron combinados con técnicas de geomorfología cuantitativa, a través de un análisis digital del terreno, el cual permite caracterizar cada una de las cuencas en estudio, y calcular los índices de erosión, así fue posible relacionar este fenómeno con las características morfo--texturales de los minerales pesados, y generar mapas con los principales atributos para cada cuenca en estudio. Tras un análisis de correlación para las cuencas estudiadas, los resultados indican que el clima es un factor importante sobre la evolución del relieve, la alta correlación entre los índices de erosión con el relieve ( $r=0.99$ ), y entre relieve calculado a diferentes radios y precipitación ( $r=0.99$ ) indican que el relieve está siendo controlado por el clima. La fuerte anti-correlación ( $r=-0.99$ ) entre la redondez de los granos y el patrón de precipitaciones demuestra que esos minerales son erosionados en sitios muy lejanos con otras condiciones climáticas y tectónicas muy diferentes a donde están siendo depositados hoy en día. La baja redondez de los circones registradas en las cuencas de los ríos Cataniapo y Parguaza soportan el hecho de que los terrenos fuentes para esos minerales están muy cerca, así se tiene dos poblaciones o tendencias, aquellos que vienen de muy lejos en donde las condiciones de clima y tectónica son diferentes, cómo, por ejemplo, la Cordillera Oriental de Colombia, y el flanco surandino; y la segunda población con una fuente muy cercana, en este caso el macizo guayanés. Ese trabajo demostró que las 3 cuencas están drenando áreas completamente diferentes en términos de edades, lo que se traduce en múltiples fuentes. En río Cataniapo se obtienen dos poblaciones:  $59,9 \pm 8$  Ma (Paleoceno-Eoceno) y  $854.6 \pm 100$  Ma (Precámbrico), que indica como terreno fuente alguna influencia de Los Andes y la mayoría del cratón de Guayana. La muestra del río Meta drena áreas mucho más jóvenes cuyas edades coinciden con las edades reportadas dentro de Los Andes de Venezuela por Kohn et al., (1984) y en la Cordillera Oriental de Colombia, para esta muestra pudo discriminarse tres poblaciones de edades:  $87,8 \pm 10$  Ma

(Cretácico tardío),  $191,5 \pm 60$  Ma (Mesozoico) y  $383,3 \pm 45$  Ma (Paleozoico). Por último, en la muestra del río Parguaza se encuentran dos poblaciones de edades:  $466,7 \pm 170$  Ma (Paleozoico), y  $903,5 \pm 208$  Ma (Precámbrico)

Castillo et al. (2015) en su trabajo “Evaluación del sistema erosivo de el volcán Popocatepetl (México) mediante análisis morfométrico”. Se analizan los perfiles longitudinales de los ríos principales del volcán Popocatépetl ( $n = 12$ ) así como la morfometría de sus cuencas ( $n = 11$ ). El objetivo es obtener información cuantitativa del relieve y explorar la relación que éste guarda con los procesos erosivos fluviales. Los resultados del análisis de los perfiles longitudinales de los ríos indican que los valores del índice normalizado de la verticalidad del canal ( $k_{sn}$ ) así como la potencia fluvial ( $AS$ ) aumentan en la transición del sistema montañoso al piedemonte. Las tasas de erosión son particularmente altas aguas debajo de las cabeceras fluviales. Se detectaron *knickpoints* ( $n = 19$ ), los cuales se asocian, por lo general, a la presencia de flujos de lava. Se encontró una mediana correlación ( $R^2 = 0.50$ ;  $n = 11$ ) entre la distancia de retroceso del *knickpoint* y el área de drenaje y una baja a moderada correlación ( $R^2 = 0.38$ ) entre las tasas de retroceso y el área de descarga. Los resultados obtenidos sugieren que la edad de las lavas y su dureza (competencia a la erosión) controlan las tasas de propagación de los *knickpoints*, los cuales retroceden a una media de  $0.05 \pm 0.2$  m a<sup>-1</sup>. La morfometría de las cuencas revela que no existe una relación directa entre la incisión fluvial y la morfología de las laderas, a pesar de que la primera es alta en la mayoría de las barrancas. Se concluyó que el sistema fluvial se encuentra en desequilibrio, probablemente debido a la intensa actividad volcánica que ha predominado en el Popocatépetl.

Esos trabajos nombrados anteriormente guardan relación con el presente trabajo de investigación debido a que la metodología utilizada por ellos coincide con muchas de las implementadas en esta investigación, por lo que fueron una herramienta valiosa y fundamental en la investigación en curso.

Espartaco (2017) en su trabajo de investigación ” Comparación de los procesos modelados del relieve actual y sensibilidad de estos mecanismos por parte de los minerales pesados: aplicaciones a subcuencas que drenan el río Orinoco y el lago de

Maracaibo” intentó un enfoque multidisciplinario empleado con la finalidad de discriminar los agentes controladores del relieve actual (clima y tectónica) para un conjunto de sectores que comprenden gran parte del territorio venezolano y una extensa porción de los llanos colombianos.

Finalmente los valores de correlación obtenidos de todas las cuencas estudiadas, indican que para el flanco norandino el factor modelador del relieve predominante es la tectónica basado principalmente en la anticorrelacion entre el relieve y la precipitación y tomando en cuenta que en esta zona existen importantes fallas estructurales como lo son la falla de la Sierra de la Cualata y el bloque tectónico de Sierra Nevada, para el flanco surandino, se considera un acoplamiento entre clima y tectónica, sin embargo el factor principal es el climático, fundamentado por la fuerte correlación existente entre el relieve y la precipitación, sin embargo se estima un aporte importante de la tectónica basado en la presencia de sistemas de falla como Boconó y Caparo. Para el ramal interior de la Cordillera de la Costa, se establece que el clima no es el principal factor modelador del relieve, ya que no hay correlación principalmente entre el clima y el relieve, así como los parámetros que estudian los efectos de precipitación sobre el relieve (índices de erosión con precipitación). Para Apure y Arauca se establece en términos generales predominancia del factor climático, puesto que la zona en su mayoría no posee grandes altitudes tendiendo a aplanarse de oeste a este lo que indica poca actividad tectónica en la zona y alta concentración de humedad proporcionada por los sistemas de drenaje que conforman las cuencas. Para el sector de la Fm. Mesa y el sector al suroeste del río Orinoco, la alta correlación entre relieve vs precipitación y los índices de erosión vs relieve, indican que el clima es el factor modelador principal, mientras que para el sector circundante a los ríos Akanán y Aparamán, aunque no se haya realizado correlación de los resultados, igualmente se infiere al clima como factor predominante, puesto que estas cuencas se encuentran ubicadas en el Cratón de Guayana, considerado una zona tectónicamente estable.

López y Uzcátegui (2014). En su trabajo “Comparación de dos sectores de la formación Mesa mediante caracterización mineralógica, textural, geomorfológica y

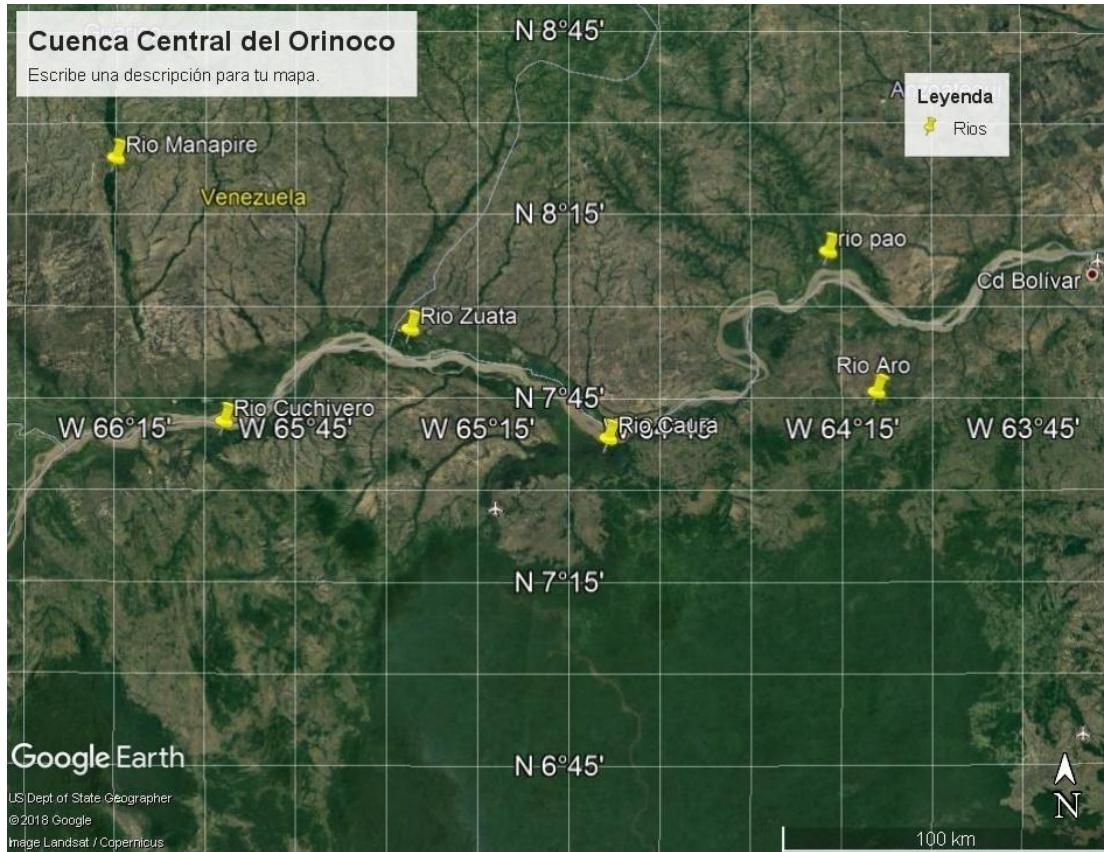
análisis de minerales pesados en el sector central de la cuenca del río Orinoco” trataron de entender la relación entre clima, tectónica y los procesos superficiales que afectan el desarrollo de orógenos en áreas circundantes a la cuenca del río Orinoco, para ello utilizaron dos herramientas: la primera, es el estudio morfo-textural de los minerales pesado, en la cual se procesaron 10 muestras que representaban las dos fracciones de 5 sub-áreas tomadas en la parte central del río Orinoco, estas muestras llamadas Peñón Aro, Borbón roca, Borbón detrítico, Fundo Mata Linda y Moitaco. La otra herramienta utilizada fue el análisis digital del terreno, con el cual se usaron imágenes de elevación digital y datos de la misión TRMM, para un estudio de geomorfología cuantitativa. El análisis digital del terreno sirvió para identificar como el drenaje erosiona cada cuenca, las diferentes pendientes presentes, además de conocer los lugares con los valores más altos de precipitación, lo que permitió establecer como la misma puede afectar y en qué medida a los índices de erosión. La cuenca que registró los valores más altos en los índices de erosión, precipitación y humedad es Peñón Aro, esto se debe a que es la de mayor área, pero la que posee el promedio más alto de humedad es Fundo Mata Linda, como consecuencia de estar ubicada sobre las Mesas Orientales, por lo que sus valores de pendiente son muy bajos. Las diferencias significativas de muestras pertenecientes a la Formación Mesa situadas al norte y al sur del río Orinoco permiten inferir diferentes fuentes, que, aunque presenten la misma litología, los minerales tienen características distintas, tanto externas producto del medio fluvial, como las impurezas y alteraciones sufridas desde su origen; las distribuciones de edades registradas en esos sedimentos podrían ser diferentes en cada sector de la Formación Mesa.

Estos últimos dos trabajos mencionados previamente tienen relación con el presente trabajo en las zonas de estudio ya que todos estos se centran sobre la cuenca principal del río Orinoco, justo en el sector central de la cuenca la cual abarca la formación mesa al norte y el escudo Guayanés al sur.

## CAPITULO II GENERALIDADES

### 2.1 UBICACIÓN GEOGRAFICA

El área de estudio es mostrada en la Figura 2.1. Esta se encuentra en la parte central de la cuenca del río Orinoco



**Figura 2.1** Ubicación área de estudio (tomado de google earth)

De esta área de estudio se analizaron los ríos al Norte (Manapire, Zuata y Pao) Figura 2.2 y los ríos al Sur (Cuchivero, Caura y Aro) Figura 2.3







**Figura 2.3** Cuenca del río Orinoco. Región alto Orinoco – Región Orinoco sur. Mostrando los ríos que se trabajaran al sur (Cuchivero, Caura y Aro). (Base de datos Ingeomin)

Los sectores más altos se encuentran al norte hacia el Macizo Oriental, hacia el centro se encuentran muy poca variación de elevaciones y hacia el sur estas planicies terminan en forma brusca. También se pueden encontrar farallones en diversos lugares de las mesas. Así mismo, por la vertiente atlántica se pueden localizar múltiples terrazas, donde la diferencia de alturas entre estas oscila entre 3 a 5 metros (Vila, 1950)

Esta zona tan plana tiene un relieve promovido por ríos que, naciendo en las mismas mesas, la bisectan formando farallones o pendientes fuertes y eventualmente sistemas de terrazas. La topografía más local de las planicies está limitada a relieves suavemente ondulados, a colinas bajas ocasionales y a roturas de pendientes con restos de laterita (Comerma y Chirinos, 1976).

### **2.2.2 Suelos**

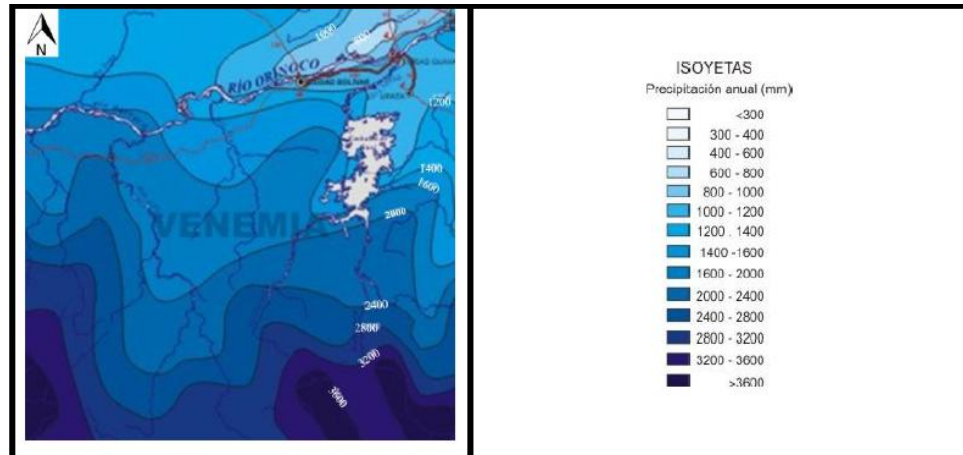
Los suelos predominantes en el arco de las mesas se encuentran pocos erosionados, descartando las cañadas de los ríos y quebradas, ya que esta área comprende una superficie muy plana. Esta zona presenta una alta permeabilidad y debido a ello acarrea un pasto corto y árboles esparcido ocasionado por la poca humedad del lugar (Vila, 1950).

Según Comerma y Chirinos (1976), Los suelos más comunes en las denominadas “Mesas Orientales” en Venezuela constituyen el bloque más grande y uniforme de suelos arenosos, altamente meteorizados y de baja vegetación en la sabana, estando constituidos por los Paleustults, Haplustoxs y Psamments. Todos ellos poseen en común, suelos compuestos por capas superficiales muy arenosas; aumentos variables de arcilla con la profundidad; bajas saturaciones en bases; una predominancia de arcillas caoliníticas y las arenas dominadas por cuarzo. Las diferencias entre estos suelos es el grado de aumento en arcilla con la profundidad, la estructura del subsuelo y la mayor capacidad de retención de agua en ellos con argílico, lo cual origina el crecimiento de plantas perennes como *Pinus Caribea*.

### **2.2.3 Climatología**

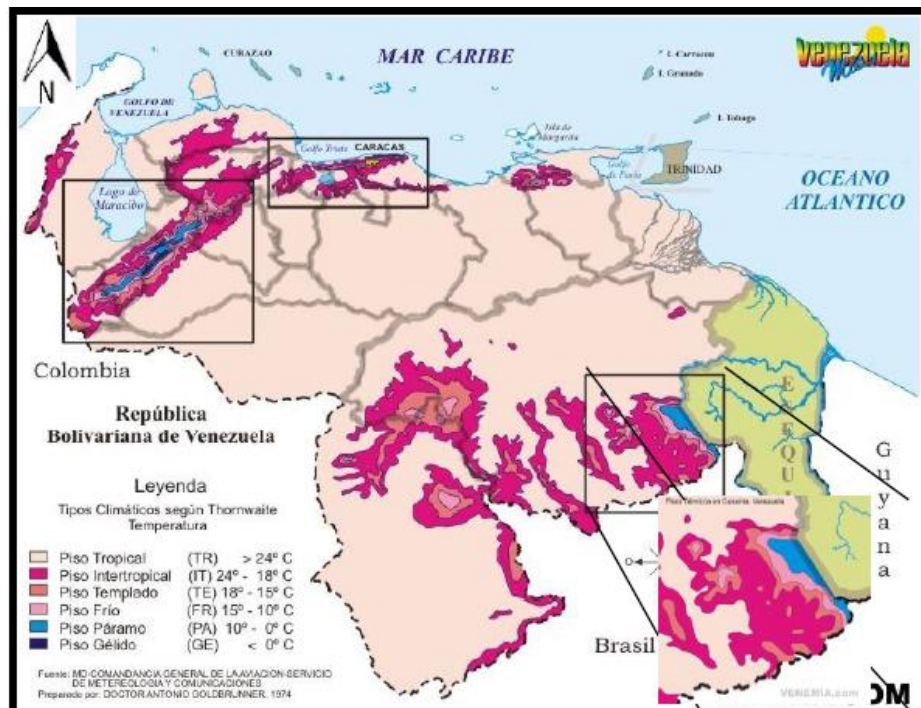
Las Mesas presentan una temperatura aproximada de 26° a 28°, aumentado respectivamente hacia el sur motivado a que esta zona se encuentra influenciada por las zonas más bajas, el cual ocasiona una temperatura de 28°. Mientras que hacia los Llanos de Monagas los vientos marítimos que se cruzan por encima de este permiten las medias de 27° y 26° en las Mesas Orientales. Debido a que el área no posee mucha vegetación producto de la alta permeabilidad del suelo se originan estas temperaturas y no permitiendo un descenso térmico. Las elevaciones que rodean las fuentes del río Orinoco y que oscilan algo por encima de los 1000 metros, permiten aceptar una precipitación abundante seguramente superior a la medida de los 2000 mm. La zona de mayor precipitación se localiza hacia las cercanías del Macizo Oriental (Vila, 1950).

Debido a la influencia de los climas tropicales provenientes de la cuenca amazónica y de los vientos alisios que vienen del sureste y del noreste, las curvas de precipitación en la zona de estudio varían en forma paralela desde el sur del país hacia el norte y desde la zona deltaica del Orinoco y noreste de Guayana (Figura 2.4).



**Figura 2.4** Tasa de precipitación anual promedio para el área de estudio (Tomado y modificado de [www.venemia.com](http://www.venemia.com)).

Por medio de la clasificación climatológica se pueden inferir 6 pisos térmicos en Venezuela (Thornthwaite, 1948), donde estos se relacionan directamente con la altitud y de acuerdo a las características del relieve. Estos pisos térmicos se encuentran a lo largo de la Cordillera de Los Andes, Cordillera de la Costa y Macizo Guayanés. A continuación se evidencia de manera más ilustrativa en la Figura 2.5 los tipos climáticos y de temperatura en la zona de estudio.



**Figura 2.5** Tipos climáticos de Venezuela según Thornwaite, pisos térmicos (Tomado y modificado de [www.venemia.com](http://www.venemia.com)).

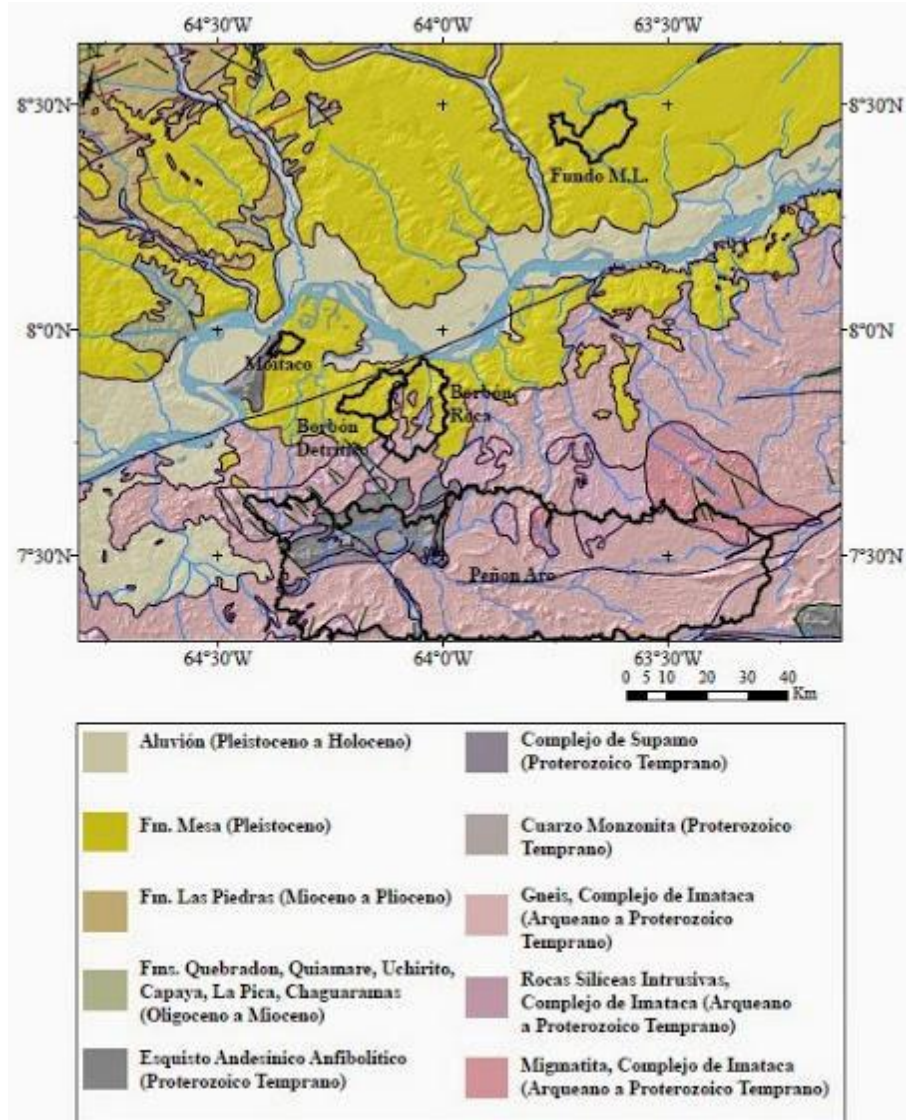
### 2.2.4 Hidrografía

Por ser una zona altamente permeable los ríos son de poco caudal, donde la mayoría de ellos desaparecen durante la estación de sequía al menos que reciban el beneficio de las filtraciones conservando así su caudal a lo largo de todo el año. Producto de la poca dureza de los suelos los valles fluviales son profundos. La permeabilidad en estos suelos produce una filtración muy enmarcada de las aguas de lluvia, pero debido a que hacia los horizontes inferiores se haya capas impermeables las aguas filtradas se ven obligadas a salir de nuevo a la superficie (Vila, 1950).

### 2.3 GEOLOGIA REGIONAL

La zona de estudio se encuentra ubicada entre dos regiones geológicas opuestas, las cuales están divididas por el río Orinoco transversalmente, donde la parte norte es la región de los Llanos, el cual es de edad Cenozoica y la otra es la región del Escudo de Guayana de edad Precámbrico. La formación aflorante en la zona de estudio es la Formación Mesa (Pleistoceno), la cual se encuentra apoyada sobre la Cuenca Oriental

y el Escudo de Guayana. A continuación se muestra en la Figura 2.6 la Formación Mesa que está representada por el color amarillo y así como también las diferentes cuencas analizadas en la presente investigación.



**Figura 2.6** Mapa geológico de Venezuela con las cuencas de interés superpuestas (Modificado de Hackley et al., 2006).

### 2.3.1 Marco Estratigráfico

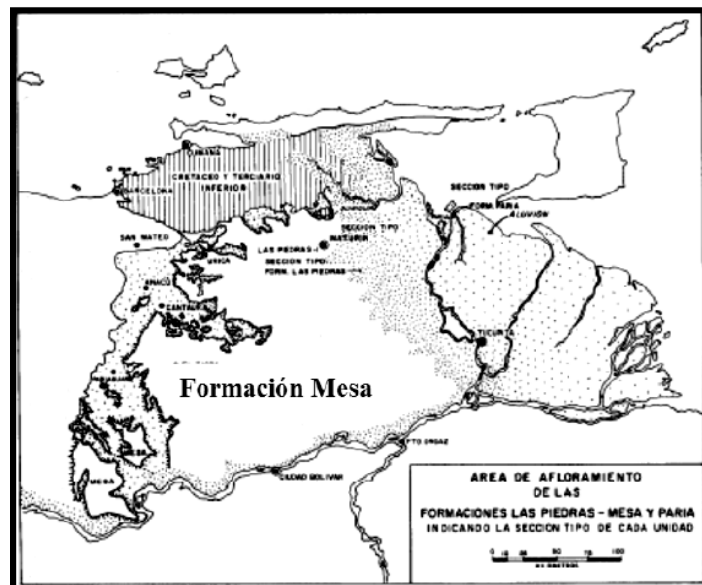
La estratigrafía del área está definida principalmente por la Formación Mesa, la cual es de edad Cuaternario (Pleistoceno) identificada por Hedberg y Pyre (1944). La Figura 2.7 muestra la distribución en superficie de esta formación. La litología de la

formación según González de Juana (1946): “*consiste de arenas de grano grueso y gravas, con cemento ferruginoso cementadas y muy duras; conglomerado rojo a casi negro, arenas blanco-amarillentas, rojo y púrpura, con estratificación cruzada; además contiene lentes discontinuos de arcilla fina arenosa y lentes de limolita. Los sedimentos de la Formación Mesa, gradan de norte a sur, de más gruesos a más finos al alejarse de las cadenas montañosas del norte; desde la parte central de Monagas al macizo de Guyana, gradan de más finos a más gruesos*”.

La Figura 2.7 muestra los estratos conglomeráticos que caracterizan a la Formación Mesa y la Figura 2.8 el área de afloramiento.



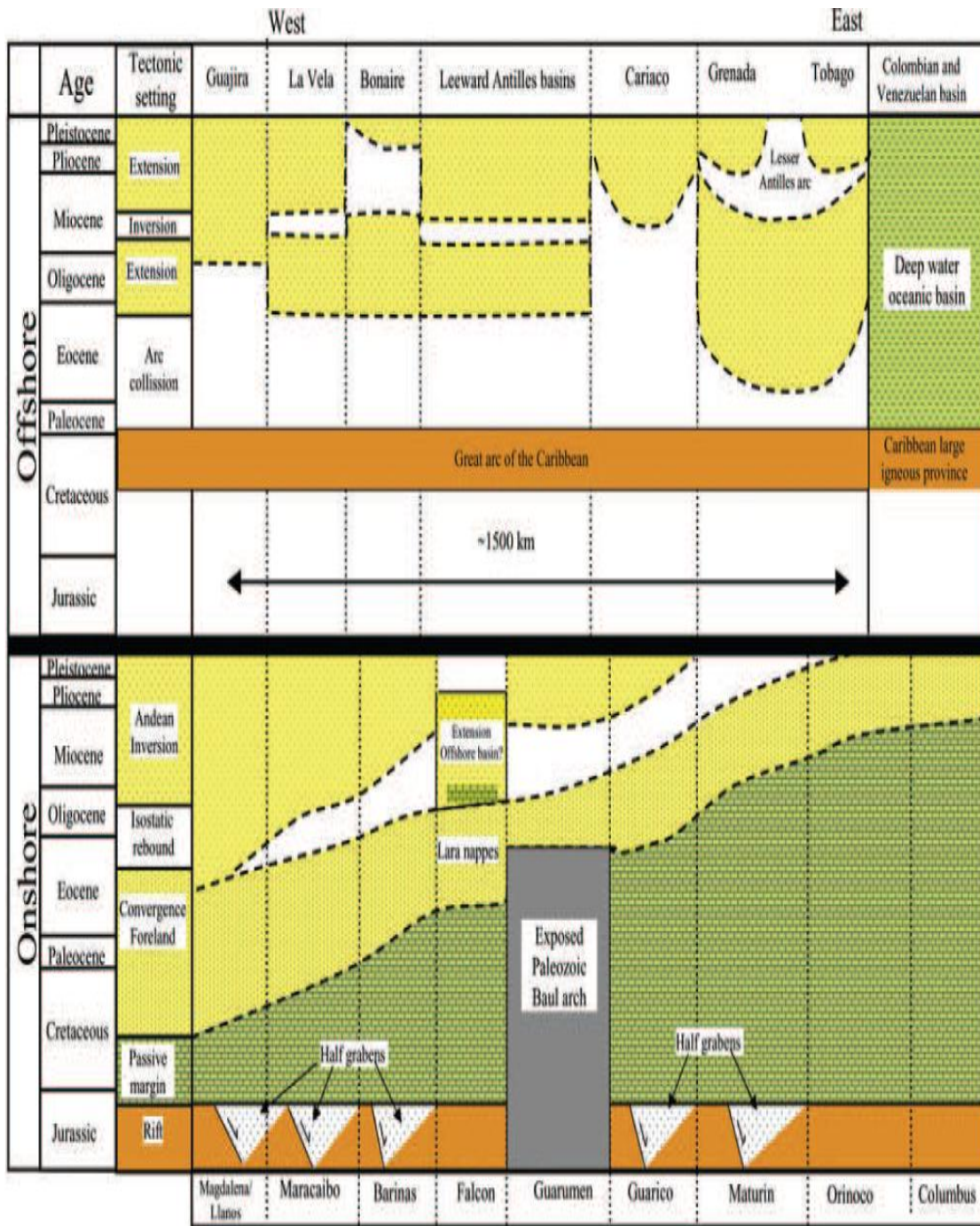
**Figura 2.7** Estratos conglomeráticos de la Formación Mesa (LEV, 2010).



**Figura 2.8** Área de afloramiento de las formaciones en la Cuenca Oriental (Tomado de: González de Juana et al., 1980).

La estratigrafía de la Formación Mesa consiste, según González de Juana (1946), en una intercalación coalescente de abanicos aluviales, sedimentos fluviales, deltaicos y pantanosos. En cambio, Zinck y Urriola (1970), consideran a la formación bajo criterios geomorfológicos y pedoestratigráfico como un depósito torrencial de ambiente semi-árido, contemporáneo con un levantamiento de la Serranía del Interior a principios del Pleistoceno.

Estas relaciones estratigráficas indican que la Formación Mesa constituye un cambio completo de las condiciones ambientales, tanto en las zonas ablacionales como en los sectores depositacionales. Este cambio podría lógicamente coincidir con el inicio del Cuaternario (Zinck, 1970). La Figura 2.9 representa un bosquejo de lo antes mencionado.



**Figura 2.9** Cuadro Carta estratigráfica regional simplificada mostrando la edad y configuración tectónica de las cuencas internas y costa afuera. Nótese la diferencia de edades entre las cuencas foreland del oeste (Paleógenas) y las del este (Neógenas) esto se debe al movimiento de la Placa del Caribe. Costa afuera las diferentes cuencas no siguen el mismo patrón de deformación como las cuencas internas con una fase extensional durante el Eoceno–Oligoceno seguido por una inversión Miocena medio. La única cuenca interior que no sigue el patrón de las cuencas antepaís es la cuenca de Falcón cuya evolución es similar a las de costa afuera (Escalona y Mann, 2011).



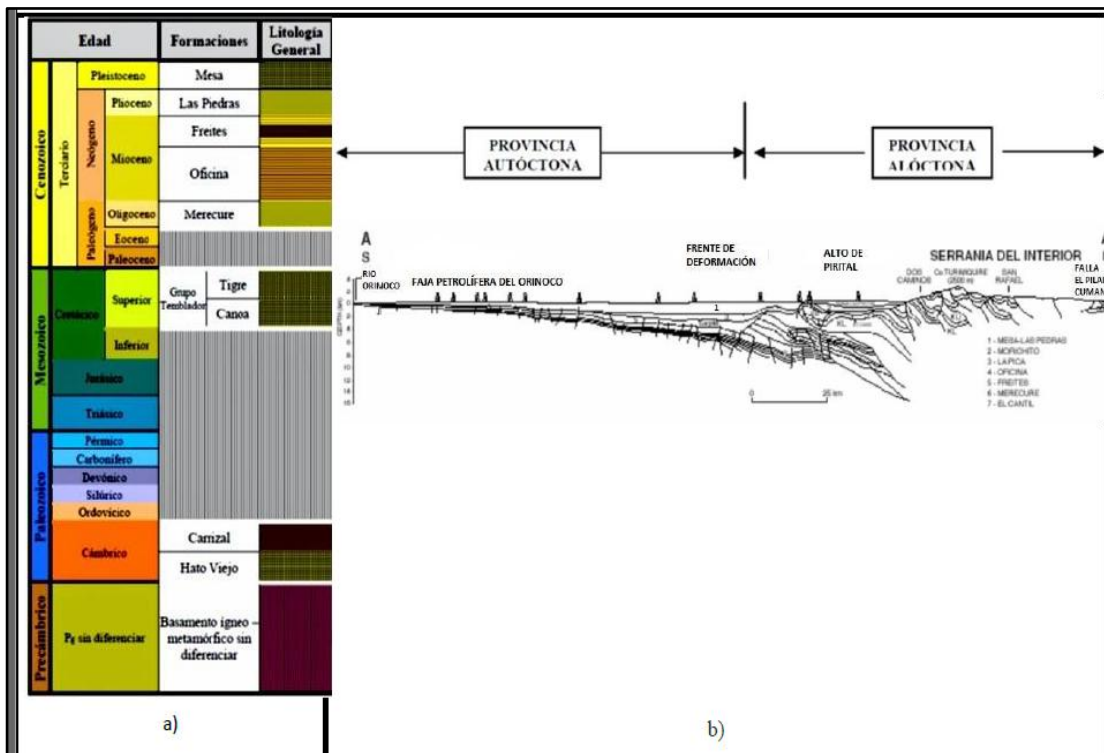


Figura 2.10 a) Columna estratigráfica y b) Corte Geológico de la Cuenca Oriente (Yoris y Ostos, 1997).

La Cuenca Oriental presenta un perfil estratigráfico (ver Figura 2.10), en el cual se puede observar el adelgazamiento de esta hacia el sur, donde el Cratón emerge, evidencias de esto es el mapa de gravimetría (ver Figura 2.11), presentando el aumento de los valores de norte a sur, esto indica la cercanía del Cratón como basamento de la cuenca.

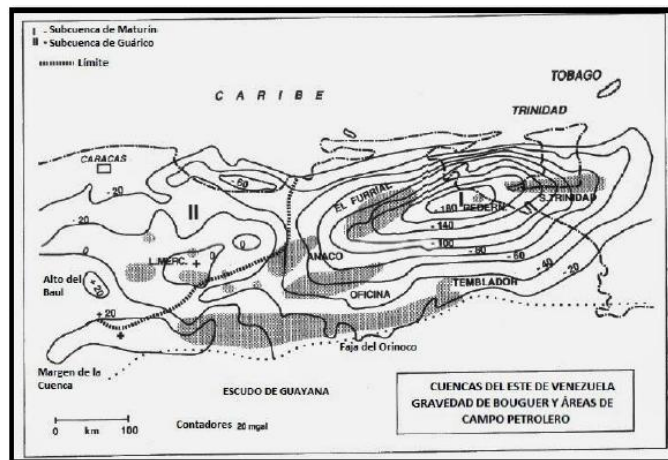
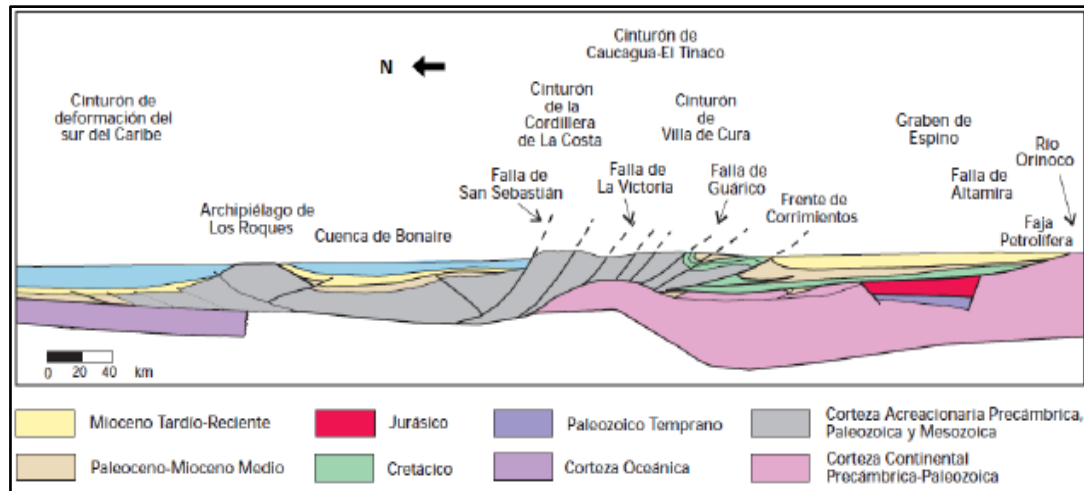


Figura 2.11 Mapa gravimétrico de Bouguer de la cuenca Oriental de Venezuela (Pratsch, 1994).

### 2.3.2 Marco Estructural

La zona de estudio se encuentra dividida en dos partes por el río Orinoco, al norte los Llanos Orientales, los cuales están caracterizados por el graben de Espino (Jurásico); según Yoris y Ostos (1996) se formaron por la apertura del Proto-Caribe, lo que originó valles de extensión con dirección preferencial Noreste (ver Figura 2.12).



**Figura 2.12** Corte geológico representando estructuras expuestas al norte del río Orinoco (Tomado de: Yoris y Ostos, 1997).

El rasgo estructural característico de la parte sur del río está influenciado por el Cratón de Guayana, marcado por la alineación tectónica de rumbo Suroeste al Noreste. Esta orientación preponderante se manifiesta especialmente en los contactos geológicos y en el rumbo de los afloramientos de las rocas volcánicas. Las observaciones indican, la influencia predominante de un fallamiento normal de rumbo noreste, durante la mayor parte del ciclo Cuchivero. Por tanto, los movimientos verticales iniciales entre los diferentes bloques de la corteza desarrollaron pliegues y fallas incipientes en la cobertura riolítica (Mc Candless, 1965).

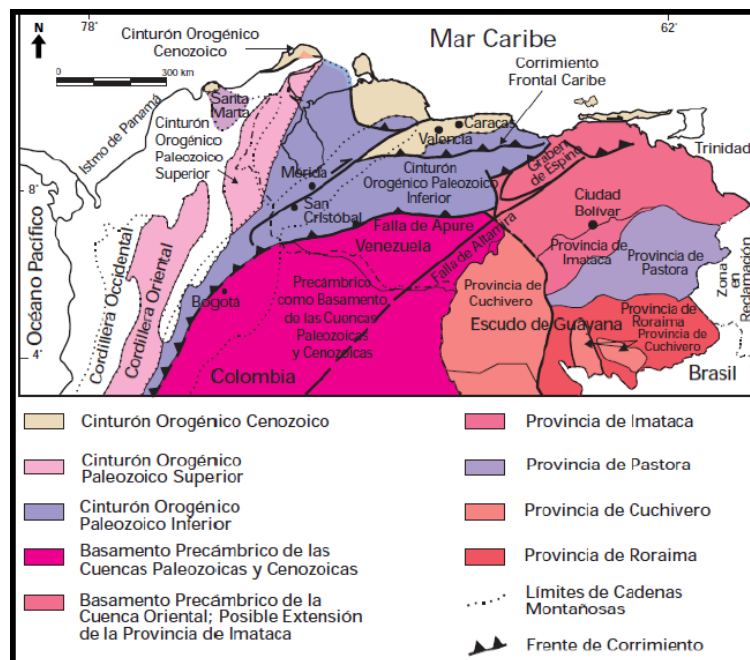
Existe una estructura significativa representada por un sinforme este-oeste con plegamientos superpuestos y pliegues isoclinales apretados situados en la región del río Aro, en el extremo noreste de la Provincia de Imataca (Mendoza, 2005). Además, se encuentra la falla de Guri que constituye el rasgo megatectónico más relevante del

Escudo de Guayana, la cual separa las Provincia de Imataca, al norte de Guri, de Pastora, al sur (considerada una falla muy antigua).

Existen dos fallas principales y sistemas de fallas menores que cortan las rocas del complejo de Imataca, donde se pueden encontrar las fallas de El Pao y Ciudad Piar-Guri, de tipo transcurrentes así como también la falla de río Claro. Igualmente se puede encontrar la falla de Santa Bárbara que se interpreta como una falla inclinada con el lado norte levantado (Kalliokoski, 1965).

En la zona de Borbón se han deducido pequeñas fallas como la de Canaguapana con dirección sureste, la falla del río Aro con dirección suroeste- noreste y la falla de Agua Blanca, pero son escasas las evidencias de fallamiento. No obstante, los gneises encontrados en el área han sufrido un intenso cataclasismo (Ortegano, 2012).

De forma general en la Figura 2.13 se pueden observar las estructuras geológicas encontradas al norte del río Orinoco.



**Figura 2.13** Aspectos generales relacionados con la tectónica, geología estructural y superficial del delta del Orinoco. (Yoris y Ostos, 1997).

### **2.3.3 Marco Tectonoestratigráfico**

La Formación Mesa se encuentra en la Cuenca Oriental, la cual según Parnaud, et al. (1995), presenta una evolución geodinámica dividida y caracterizada en cuatro fases principales descrita a continuación:

#### **2.3.3.1 Fase de la mega secuencia Prerifting:**

Las formaciones Carrizales y Hato Viejo de edad Paleozoica que están asociadas a la subcuenca de Guárico, fueron depositadas en ambientes marinos costeros a neríticos. Las secuencias encontradas son arenas de grano grueso ligeramente calcáreas con intercalaciones de conglomerados y lutitas verdes.

#### **2.3.3.2 Fase de la mega secuencia Rifting**

La fase se desarrolla durante el Jurásico Tardío y el Cretácico Temprano. En la región central se encuentra una unidad en el Graben de Espino, que ha sido descrita como una megasecuencia compuesta principalmente de lutitas rojas con sills basálticos, con un espesor reconocido sísmicamente en semi-grábenes que puede alcanzar los 3.600 m; la cual es correlacionable con la Formación La Quinta en el occidente. El Albiense marca el inicio de la depositación diacrónica de este a oeste de la cuenca, producto de la transgresión marina que llega a cubrir grandes zonas del sur que se encontraban erosionadas.

#### **2.3.3.3 Fase de la mega secuencia del Margen Pasivo**

La fase se caracteriza por la subsidencia pasiva del margen norte de Suramérica desde el Cretácico temprano hasta el Eoceno. Durante este tiempo se depositaron de 3 a 4 km de rocas clásticas marinas, además de unidades carbonáticas durante el Cretácico Temprano. Las unidades cretácicas del margen pasivo inician con la depositación de la Formación Barranquín, sobre esta se depositan las unidades carbonáticas de plataforma, Formación El Cantil, que marcan el nivel máximo transgresivo y son diacrónicos de norte a sur.

#### 2.3.3.4 Fase de la mega secuencia de Colisión Oblicua

Los primeros indicios de esta fase ocurren en el Eoceno Medio, donde aparecen unidades carbonáticas en el Oeste, formaciones Peña Blanca y Caratas, producto de los surcos que se estaban formando al norte. La fase del Margen Pasivo finaliza en el Oligoceno Medio por la colisión de la Placa del Caribe con la suramericana, a partir de allí la cuenca pasa a ser de tipo ante-país. La colisión se va desplazando hacia el este, lo que ocasiona una disminución de la influencia de los frentes de corrimientos, ocasionando así la migración del surco de Guárico hacia el sur, dando origen a la Formación Roblecito, en la actualidad continua el levantamiento. La cuenca pasó a tener secuencias de Flysch y Olistostromos, propias de la actividad tectónica del levantamiento del Arco de Islas.

El cierre de la Cuenca Oriental con la colmatación de los Llanos crea la migración de los Deltas provenientes de los afluentes del Escudo para formar el Delta actual del Orinoco, esto crea las condiciones para la depositación de la Formación Mesa. González de Juana et al. (1980), relaciona las llanuras del Orinoco con una superficie sub horizontal de meteorización-erosión, la cual posee un nivel topográfico bien marcado, correlacionado con la superficie de los llanos y tomado como indicador de períodos de pleniplanación en el pasado geológico.

#### **2.3.4 Origen de la Formación Mesa**

Debido a las diferentes discusiones expuestas por los distintos autores, Zinck y Urriola (1970), llegó a las siguientes conclusiones en cuanto al origen de la Formación Mesa:

##### 2.3.4.1 Explicación fluvial:

Empieza desde el frente de montaña por un plano inclinado de explayamiento generalizado, que nunca llega a asimilar antiguos conos de deyección. La baja proporción de limos, a su vez, indica que el medio de transporte no ha sido de tipo fluvial.

#### 2.3.4.2 Explicación deltaica y palustre:

Hasta el Este de Maturín, donde buza por debajo de sedimentos más recientes, la Formación Mesa no presenta muestra ni organización espacial, ni facies de delta. No hay brazos deltaicos ni cubetas. Las posiciones y los sedimentos de explayamiento son exclusivos. Sin embargo, es muy probable que la parte fosilizada, aguas abajo de Maturín, haya pasado progresivamente a un sistema deltaico, como ocurre hacia el Este con todas las acumulaciones más recientes.

#### 2.3.4.3 Explicación periglacial:

Se han realizado investigaciones en la Serranía del Interior y no han revelado influencia glacial alguna, como por ejemplo evidencias de morrenas. La Formación Mesa en sí no presenta, ningún síntoma de eventuales influencias periglaciales.

### **2.3.5 Características generales descritas por las principales edades que marcaron importantes eventos geológicos en la Formación Mesa**

#### 2.3.5.1 Pre- Cámbrico

Según Stanley (1999), estableció por medio del magnetismo y otras evidencias geológicas que entre los tiempos de la orogénesis Grenviliana, entre 1200- 1000 millones de años, y hace 500 millones de años, se comenzaron a producir los primeros grandes sucesos de fragmentación y saturación continental (ver Figura 2.14), al menos un supercontinente, probablemente dos, efectuándose hasta los eones Proterozoico y Fanerozoico. Producto de la extensa sutura, las masas que luego serían Gondwana rodearon la mayor parte de Laurasia, llamándose a estas dos partes en conjunto como Rodinia (ver Figura 2.15). Uno de los más importantes eventos de rifting de todos los tiempos, se originó entre los 800 y 700 millones de años atrás debido al fracturamiento a la mitad de Rodinia y ocasionando la ruptura de un gran bloque de Laurasia teniendo como producto al Océano Pacífico. Luego de que se formara el Océano Pacífico, el bloque remanente produjo un fragmento oriental de Gondwana.



Figura 2.14 Modelo de evolución geológica (Ramirez, 1982).

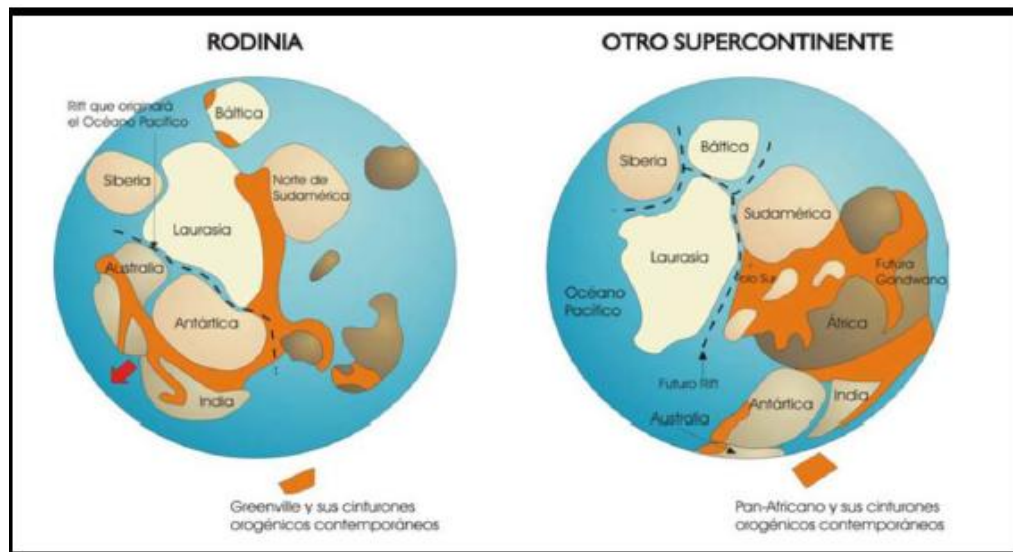


Figura 2.15 Cambio en los patrones paleogeográficos a finales de la Era Proterozoica y principios del Paleozoica (Stanley, 1999).

### 2.3.5.2 Cámbrico (540- 500 m.a)

Los cratones Norafricano y de Guayana a principios del paleozoico formaron parte de un extenso margen continental que se extendía hacia el norte en dirección Geosinclinal Caledoniano, con dirección este- oeste a lo largo del borde oriental del Escudo de Brasil (Benedetto, 1982).

En el período Pre-Cámbrico debido a que los mares eran muy extensos, las masas continentales sufrían inundaciones notables y levantamientos periódicos por tiempos aproximadamente largos, mientras esto ocurría los cratones terrestres se encontraban generalmente por encima del nivel del mar (Stanley, 1999). Producto de las inundaciones que sufrían los continentes, los sedimentos siliciclásticos fueron erosionados y acumulados alrededor del margen continental, formando cinturones de depositación marina, también tuvo contribución de los sedimentos derivados del cratón depositados en el cinturón más interno. Estos cinturones se encuentran alternados en el interior a lo largo de la línea de costa en el Cámbrico medio a tardío y fueron arreglados con patrón concéntrico.

#### 2.3.5.3 Silúrico (440- 360 m.a)

Principalmente la sedimentación en Sudamérica ocurrió en el Silúrico temprano a tardío. Los sedimentos de esta edad se encuentran alojados en Matto Grosso (Brasil) y al oeste, lo que probablemente señala una conexión entre el Amazonas y la cordillera al norte de Bolivia (Weeks, 1946).

#### 2.3.5.4 Devónico (415- 360 m.a)

En los periodos Silúrico y Devónico se mantuvo un alto nivel del mar con relación a la superficie de los principales cratones originada por la migración de la línea de costa hacia el noroeste desde el Cámbrico hasta el Silúrico y como consecuencia se obtuvo la ausencia de capas al norte de América del sur en el Silúrico Devónico relacionada directamente con un movimiento suave de ascenso del Cratón de Guayana (Benedetto y Ramírez, 1985).

#### 2.3.5.5 Carbonífero- Pérmico (360- 260 m.a)

En este período de tiempo se originó la orogenia llamada Herciniana, el cual describe un movimiento hacia el norte de Gondwana produciendo una colisión del continente con Eurasia.



En el Carbonífero tardío, se produjo una emersión de las placas continentales y actividad orogénica.

La actividad orogénica para este periodo fue intensa. Se formó el supercontinente denominado Pangea, a causa de la unión entre los principales continentes a principios de la era Mesozoica.

### **2.3.6 Rasgos fisiográficos y geomorfológicos de la provincia de Guayana venezolana y llanos del Orinoco**

El escudo de Guayana tiene forma oval, su expresión septentrional se encuentra en Venezuela al sur del Orinoco. Tiene 4 eventos tecto-termales calculados en base a las edades radiométricas que representan periodos orogénicos precámbricos de Venezuela. (Guriense, Pretransamazonico, Transamazonico y Orinoquense). Son rocas mayormente precámbricas. Con cursos de ríos que generalmente tienen direcciones S-N a excepción del río Cuchivero que tiene dirección NO subnormal al Orinoco. Con cuatro niveles erosionales, cada uno de los cuales representa la culminación de un ciclo de peniplanación. Según Martín et al. (1975) en Gonzales de Juana, 1980 existe:

#### **2.3.6.1 Plano aluvional del Orinoco y superficie reciente de los llanos de edad reciente – plioceno.**

Es ancho hacia el oeste de la curva del infierno y los afloramientos de rocas se alejan de margen del Orinoco, mencionando que en el río Caura los primeros saltos están a 75 km de su desembocadura. Por su parte la superficie reciente de los llanos, tiene su litología similar a la provincia de los llanos pero extensamente laterizadas y parcialmente cubiertas por pisolitas ferruginosas y lateritas aluminicas. Se desarrollan grandes bancos de sabanas y extensiones selváticas en las que aparecen aflorando rocas ígneas generalmente ácidas en forma de “lomos de ballena”.

#### **2.3.6.2 Superficie Caroní – Aro y nivel intermedio edad terciario**

Lomos alargados entre 300- 370 y 400 – 450 m, cuyos topes son planos que representan espesas masas de lateritas ferruginosas enriquecidas que corresponden

principalmente a restos ocasionales de cadenas meta volcánicas básicas, pertenecientes a la provincia de Imataca.

#### 2.3.6.3 Superficie de Imataca de edad Cretácica superior

Esta caracterizada por la altiplanicie de Nuria, escarpas inferiores de Pakaraima y los topes planos de la provincia Geológica de Imataca las cuales tienen yacimientos de hierro de alto tenor, bauxita y lateritas aluminicas. Pertenecientes a la provincia de Imataca. Con valle anchos y suaves separados por lomas redondeados o crestones estrechos y pronunciados con afloramientos de cuarcitas ferruginosas que tienen rumbos subparalelos al grano de la serranía con dirección E- O. Donde los altos son generalmente Cuarcitas ferruginosas y los bajos están comprendidos por Gneises.

#### 2.3.6.4 Superficies de Kamarata de edad desconocida

Es parte de la provincia de Roraima Con topes subhorizontales, contorno irregular e indentado y acantilados cortados a picos que tienen muchos saltos entre ellos el Salto Ángel. (Gonzales de Juana, 1980)

## CAPITULO III

### MARCO TEÓRICO

#### 3.1 GEOMORFOLOGÍA CUANTITATIVA

La geomorfología, en sus inicios, era una ciencia que se basaba principalmente de la observación directa de los efectos y procesos que ocurren en la superficie terrestre. En la actualidad esta ciencia ha desarrollado métodos y técnicas computacionales que permiten extraer aún una mayor cantidad de información que la derivada de simples observaciones, lo cual se resume en la llamada *geomorfología cuantitativa* (Wood, 1996 en Arcia y Viana, 2013).

Hoy en día, el campo de la geomorfología abarca una gama muy amplia de diferentes enfoques e intereses. Los investigadores modernos pretenden sacar "leyes" cuantitativas que rigen los procesos de la superficie terrestre, pero igualmente, reconocen la singularidad de cada paisaje y el entorno en el que operan estos procesos. Algunos hechos particularmente importantes fueron tomados de la geomorfología contemporánea, los cuales son:

- a) Que no todos los paisajes pueden ser considerados "estable " o "perturbado", donde este estado perturbado es un desplazamiento temporal fuera de alguna forma ideal. En su lugar, los cambios dinámicos del paisaje se ven ahora como una parte esencial de su naturaleza (Whipple, 2004; Allen, 2008 en Arcia y Viana, 2013).
- b) Que muchos sistemas geomórficos se entienden mejor en términos de la aleatoriedad de los procesos que tienen lugar en ellos, es decir, las distribuciones de probabilidad de las magnitudes de eventos y los períodos de retorno (Benda y Dunne, 1997). Esto, a su vez, ha señalado la importancia del determinismo caótico de los paisajes, y que las propiedades del paisaje sean mejor representadas estadísticamente (Dietrich et al., 2003 en Arcia y Viana, 2013).

Así, uno de los objetivos de la geomorfología cuantitativa es encontrar las expresiones matemáticas que faciliten entender los procesos naturales que dan origen

a las diferentes geoformas presentes en el paisaje (Mayer, 1990). Cuando estos cálculos se realizan a partir de modelos digitales de elevación (MED) o modelos numéricos del terreno (MNT), el procedimiento es llamado *análisis digital del terreno* (Wilson y Gallant, 2000).

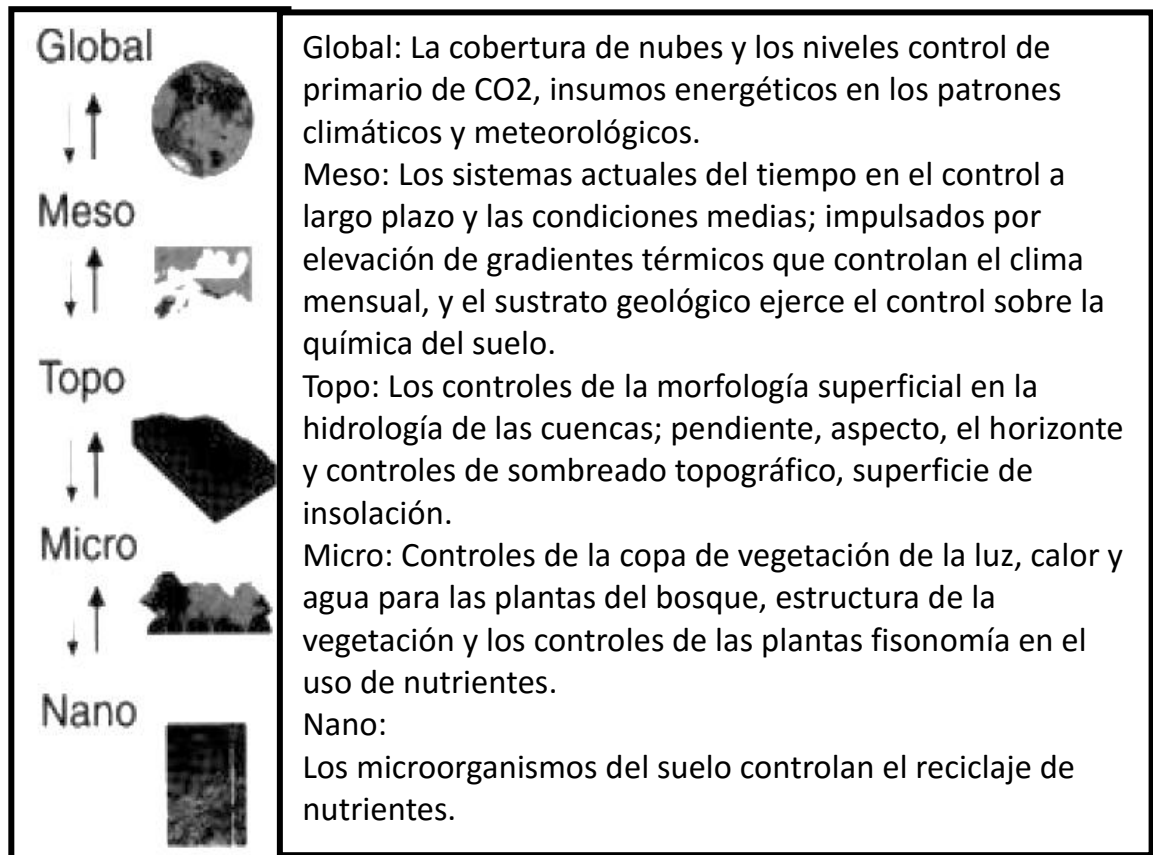
### **3.1.2 Análisis Digital del Terreno**

El análisis digital del terreno (Wilson y Gallant, 2000) consiste en la aplicación de una serie de fórmulas o expresiones matemáticas que son aplicadas a un modelo de elevación digital (MED) o modelo numérico del terreno tomando en cuenta datos recolectados en campo o datos existentes para el área de estudio. Estas fórmulas permiten el análisis y la predicción de diferentes procesos que afectan el paisaje. (Wilson y Gallant, 2000)

La técnica es muy útil ya que permite además de trabajar a diversas escalas (Figura 3.1), integrar procesos que han ocurrido a diferentes intervalos de tiempo. Muchos de los procesos biofísicos importantes que operan sobre o cerca de la superficie de la tierra están influenciados tanto por procesos anteriores, como por los actuales, las interacciones entre ellos y los cambios en las condiciones iniciales (Dietrich et al. 1992, Grayson et al., 1993, Montgomery y Dietrich 1995). Estas interrelaciones son complicadas y se puede entender mejor gracias al modelado numérico (Kirkby et al., 1996). Los límites que separan diferentes escalas espaciales y temporales no son muy claros y pueden variar con los procesos y/o paisajes involucrados de forma individual (Sivapalan y Wood 1986, Mackey 1996, Malanson y Armstrong, 1997). (Wilson y Gallant, 2000)

Todo esto hace necesario que se identifique las escalas espaciales y temporales y los factores que influyen o controlan los procesos y patrones que operan a diferentes escalas. Los beneficios potenciales pueden ser sustanciales. Dos estudios independientes y desde ámbitos científicos diferentes, el de Schaffer (1981), el cual trabajó con sistemas interactivos de la población en la comunidad ecológica y el de Phillips (1986), basado sobre ejemplos en geomorfología fluvial, demostraron que ambos procesos son claves para entender la evolución de un mismo paisaje, ya que

operan en escalas de tiempo diferentes y pueden ser considerados independientemente uno de otro. (Wilson y Gallant, 2000)



**Figura 3.1** Escalas en la que varios procesos biofísicos dominan el cálculo primario de regímenes ambientales. (Tomado de Mackey 1996 en Wilson y Gallant, 2000)

La mayoría de las investigaciones hidrológicas, geomorfológicas y ecológicas del siglo se han llevado a cabo en escalas globales, micro y nano (Figura 3.1). Las escalas meso y topo han recibido mucho menos atención, y sin embargo, estas escalas son importantes debido a que muchas de las soluciones a problemas para el medio ambiente, tales como la erosión acelerada del suelo y la contaminación no puntual, requieren cambios en las estrategias de gestión en estas escalas del paisaje (Moore y Hutchinson 1991). La influencia del sustrato geológico en la química del suelo (por ejemplo, Likens et al., 1977) y el impacto de los sistemas meteorológicos predominantes sobre altas elevaciones la cual deja sin efecto los estimados climáticos promedios mensuales (Daly et al., 1994, Hutchinson 1995) ejemplifican algunos de los controles que operan a nivel de escala meso. La influencia de la morfología de la

superficie sobre hidrología de cuencas y el impacto de pendiente, aspecto y sombreado del horizonte de insolación representan, probablemente la operación más importante de los controles en la escala topo. Numerosos estudios han demostrado que la forma de la superficie de la tierra puede afectar a la migración lateral y la acumulación de agua, sedimentos y otros constituyentes (por ejemplo, Moore et al., 1988a). Estas variables, a su vez, influyen en el desarrollo del suelo (por ejemplo, Kreznor et al., 1989) y ejercer una fuerte influencia sobre la distribución espacial y distribuciones temporales de la luz, el calor, el agua y los nutrientes minerales requeridos por la fotosíntesis de las plantas (Mackey 1996). La creciente popularidad de los trabajos en estas dos escalas intermedias durante la última década ha aprovechado la creciente disponibilidad de modelos de alta resolución, en este caso los datos continuos de elevación digital y el desarrollo de nuevas herramientas en análisis computarizados de terrenos (Wilson 1996, Burrough y McDonnell, 1998, Wilson y Burrough, 1999). (Wilson y Gallant, 2000)

### **3.1.3 Datos de Elevación Digital Fuentes y Estructuras**

La mayoría de los datos digitales disponibles, en la actualidad, conjuntos de modelos de elevación son el producto captura de datos de la fotogrametría (Moore et al., 1991). Estas fuentes se basan en la interpretación estereoscópica de fotografías aéreas o imágenes de satélite las cuales son solapadas manualmente utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) o estereo-trazadores automáticos (Carter 1988, Weibel y Heller 1991). La elevación puede ser adquirida por la digitalización de las líneas de contorno en los mapas topográficos y la realización de estudios sobre el terreno. La aparición y el uso generalizado de Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en la cartografía, geodesia y otras áreas, ofrece muchos ajustes nuevos y asequibles oportunidades para la obtención de un gran número de usos específicos (Fix y Burt 1995, Twigg 1998, Wilson 1999a). (Wilson y Gallant, 2000)

Estos datos digitales de elevación se organizan generalmente en una de tres estructuras de datos: (1) mallas regulares, (2) redes irregulares trianguladas y (3) contornos o curvas de nivel, dependiendo de la fuente y/o método preferido de

análisis (Figura 7.2). Los modelos de mayas regulares o de red son llamados modelos de elevación digital (MED), y se han convertido en la estructura de datos más usada en la última década debido a su simplicidad (es decir, las matrices sencillas de elevación que registran las relaciones topológicas entre los puntos de datos implícitamente) y facilidad de implementación en la computadora (Moore et al., 1991, 1993, Wise, 1998). Estas ventajas numéricas, a su vez se convierten en tres desventajas, en cuanto a capacidades de cómputo científico y de almacenamiento de datos. En primer lugar, el tamaño de la malla de rejilla a menudo afecta los requisitos de almacenamiento, la eficiencia computacional, y la calidad de los resultados (Collins y Moon 1981, Moore et al., 1991). En segundo lugar, las rejillas cuadradas no pueden fácilmente adaptarse a cambios bruscos en la elevación y con frecuencia, se saltan importantes detalles de la superficie de la tierra en zonas planas (Carter, 1988). Sin embargo, vale la pena destacar que muchos de los problemas en las zonas planas, se producen porque los servicios geológicos o personas que se encargan del levantamiento persisten en registrar las elevaciones en datos de tipo enteros. Adicionalmente, las trayectorias calculadas pendiente arriba de canales de flujo tienden a zigzaguear a través del paisaje y aumentar la dificultad de calcular con precisión áreas específicas de captación (Zevenbergen y Thorne, 1987; Moore et al., 1991). Varios de estos obstáculos se han superado en años recientes. Por ejemplo, no hay ninguna razón genérica por la cual los MED regulares no puedan representarse bien en áreas planas, siempre y cuando los atributos del terreno sean calculados mediante métodos que respeten el drenaje superficial (Hutchinson 1988, 1989b). De manera similar, el advenimiento de varias técnicas nuevas de compresión de datos ha reducido los requisitos de almacenamiento y mejorado la eficiencia computacional en los últimos años (por ejemplo, Kidner y Smith, 1992; Lewis y Smith 1994). Los MED con tamaños de malla de 500, 100, 30, 10, y hasta 1 m son cada vez más disponible para diferentes partes del mundo (USGS, 1993; y Hutchinson, 1996). (Wilson y Gallant, 2000)

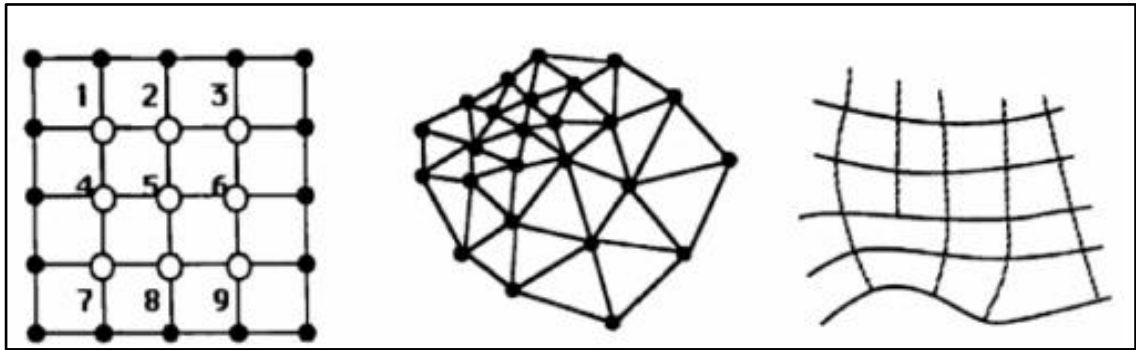
Las redes trianguladas irregulares (TIN) también han encontrado un uso extendido (por ejemplo, Tajchman 1981; Jones et al., 1990; Yu, 1997 en Wilson y

Gallant, 2000). Los TIN se basan en elementos triangulares (Facetas) con vértices en los puntos de muestra (Moore et al., 1991 en Wilson y Gallant, 2000). Estas facetas consisten en planos que unen los tres puntos adyacentes en la red y son generalmente construidos utilizando el método de triangulación Delaunay (Weibel y Heller, 1991 en Wilson y Gallant, 2000). Lee (1991) en Wilson y Gallant, 2000 Compara diversos métodos para la construcción de TIN a partir de MED reticulados. Sin embargo, el mejor TIN son las muestras de puntos superficiales específicos, tales como picos, crestas y saltos en la pendiente, y formar una red irregular de puntos almacenados como un conjunto de los valores X, Y, y Z junto con punteros a sus vecinos en la red (Moore et al., 1991 en Wilson y Gallant, 2000)

Los TIN pueden incorporar fácilmente discontinuidades y puede constituir estructuras de datos eficientes debido a que la densidad de los triángulos se puede variar para que coincida con la rugosidad del terreno (Moore et al., 1991). Esta disposición puede anular el almacenamiento adicional que se incurre cuando las relaciones topológicas se calculan y se registran de forma explícita (Kumler, 1994). (Wilson y Gallant, 2000)

La tercera estructura incorpora el concepto de redes basadas en analogías de trayectorias de corrientes o "*Stream-Path Analogy*" por primera vez por Onstad y Brakensiek (1968) el cual divide los paisajes en polígonos pequeños, de forma irregular (Elementos) en base a las curvas de nivel y sus ortogonales. Esta estructura se utiliza con más frecuencia en aplicaciones hidrológicas porque puede reducir la complejidad de ecuaciones de flujo en tres dimensiones, ya que incorpora una serie acoplada de ecuaciones en una dimensión para el caso de zonas topográficamente complejas (Moore y Foster 1990; Moore y Grayson 1991; Grayson et al., 1993). (Wilson y Gallant, 2000). (Figura 3.2)

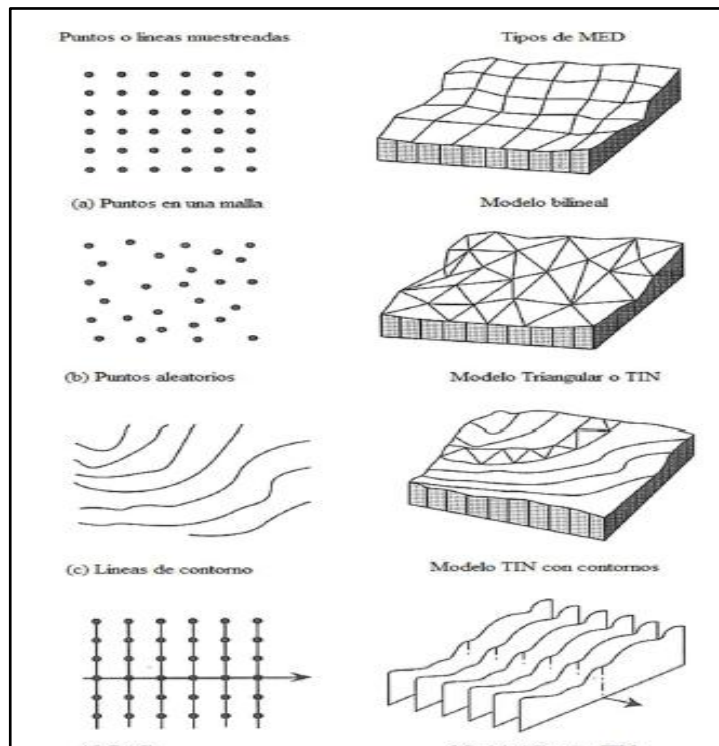




**Figura 3.2** Estructura de las redes de datos: a) regular de la red, b) una red irregular triangular c) Red basada en el contorno (Tomado de Moore, Grayson y Ladson, 1991 en Wilson y Gallant, 2000).

La proliferación de las fuentes digitales de elevación y las herramientas de pre-procesamiento significa que la elección inicial de la estructura de datos no es tan importante como lo era antes (Kemp 1997a, b). Numerosos métodos se han propuesto para convertir los datos digitales de la elevación de una estructura a otra, aunque se debe tener cuidado con cada uno de estos métodos para minimizar los efectos no deseados (Krajewski y Gibbs, 1994). Además, mientras más grande sea la cantidad de datos incorporados no necesariamente se producen mejores resultados. (Wilson y Gallant, 2000)

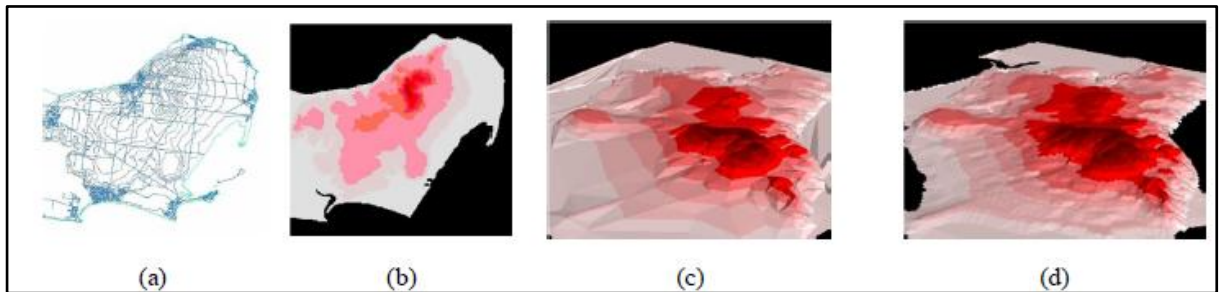
Carrara et al. (1997). Compararon varios métodos para la generación de MED a partir de líneas de contorno, sin embargo, la gama de tipos de terreno, las estructuras de la muestra, y el modelado de las rutinas es tan grande que los intentos de hacer generalizaciones acerca de las "mejores" modelos resultó muy difícil (Burrough y McDonnell 1998; Dixon et al., 1998; Wilson 1999b). (Wilson y Gallant, 2000) (Figura 3.3)



**Figura 3.3** Diferentes tipos de MED generados de acuerdo a la filosofía de muestreo de los datos de elevación digital (Arcia y Viana, 2013)

Además, algunos de los métodos de interpolación que se han propuesto son difíciles de usar. Así, Eklundh y Martensson (1995) recomendó que usuarios con menos experiencia se centraran en la calidad de los datos de entrada, en lugar de aprender sofisticados métodos de interpolación. Aunque con la simplificación de los métodos de interpolación se obtendrán resultados satisfactorios siempre y cuando los datos de entrada estén bien muestreados. La Figura 3.3, muestra diferentes tipos de muestreo de los datos de elevación y los modelos de elevación digital producidos para cada uno de ellos. (Wilson y Gallant, 2000)

La Figura 3.4 muestra las diferentes etapas durante el desarrollo del MED.

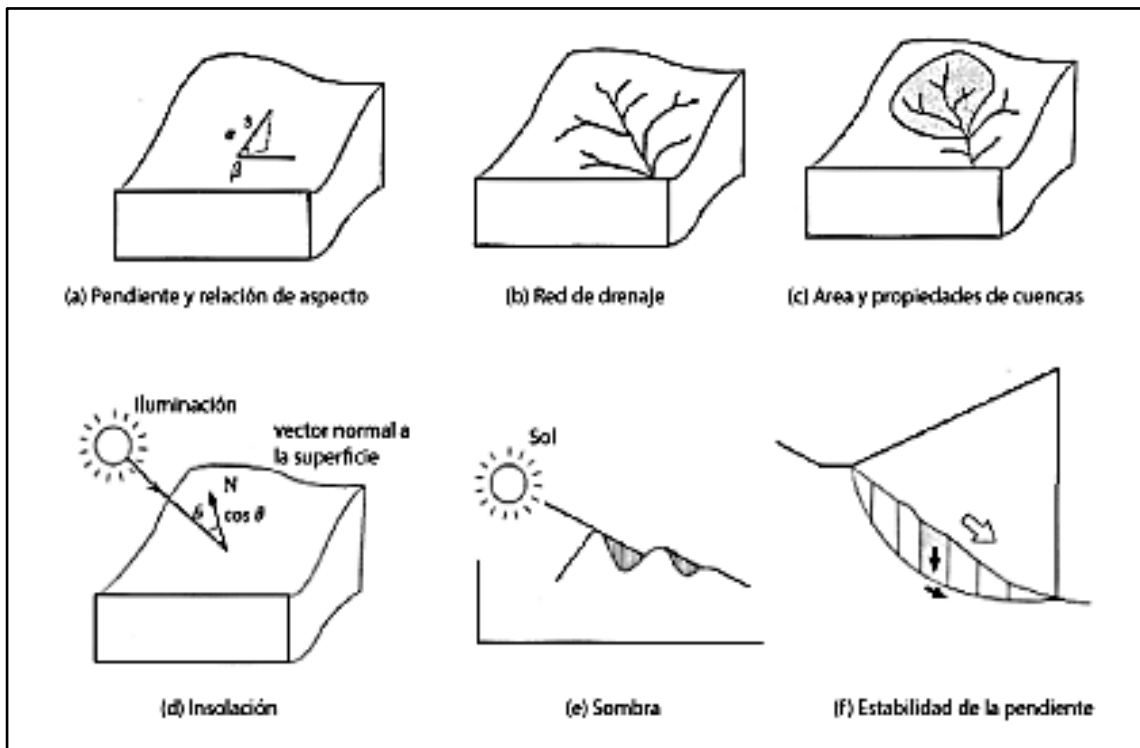


**Figura 3.4** (a) Mapa de curvas de nivel (contornos), (b) MED derivado de las curvas de nivel, (c) Modelo TIN derivado de las curvas de nivel, (d) modelo derivado de las curvas de nivel, en perspectiva (Tomado y modificado de página web del Dr. ShunjiMurai, <http://cret.cnu.edu.cn/syjsx/content/giswb/vol2/contents.htm> en Arcia y Viana, 2013)

### 3.1.4 Utilidades de los MED

- a) Determinar atributos del terreno, como es el caso de la altitud en cualquier punto, la pendiente o la orientación.
- b) Encontrar elementos del terreno tales como cuencas de drenaje, divisorias de agua, redes de drenaje y canales, cumbres y depresiones, y otros accidentes del terreno.
- c) Modelar funciones hidrológicas, flujos de energía o fuegos forestales. (Arcia y Viana, 2013)

La Figura 3.5, muestra algunos tipos de cálculos que se puede hacer a partir de los MED.



**Figura 3.5** Modelos de atributos de terrenos calculados a partir del MED. (Tomado y modificado de página web del Dr. ShunjiMurai, <http://cret.cnu.edu.cn/syjsx/content/giswb/vol2/contents.htm> en Arcia y Viana, 2013)

### 3.1.5 Atributos Primarios y Secundarios del Terreno

Muchos de los atributos topográficos más comunes se resumen en la Tabla 3.1, entre ellos están: la pendiente, área de captación específica, aspecto, plan y perfil de curvatura, entre otros, los cuales se pueden derivar de cualquiera de los tres tipos de MED (Moore et al., 1991, 1993f). Los análisis individuales de terreno son herramientas que se han clasificado en diferentes formas, y se basa en las características de los atributos calculados y/o su extensión espacial. Los atributos principales o primarios del terreno (Wilson y Gallant, 2000) son aquellos que se calculan directamente desde el MED. Los atributos secundarios o compuestos son aquellos que implican combinaciones de los atributos primarios y constituyen una base física o conjuntos de derivados empíricamente. Los índices que se pueden caracterizar incluye la variabilidad espacial de los procesos específicos que ocurren en el paisaje (Moore et al., 1991; 1993). La Tabla 3.1 resume los principales

atributos primarios que pueden ser calculados a partir de un MED. La mayoría de estos atributos topográficos se calculan a partir de las derivadas direccionales de una superficie topográfica. Se pueden calcular directamente, a través de métodos de diferencia finita, o mediante el ajuste de una función de interpolación bivariada  $z = f(x, y)$  (Moore et al., 1993; Mitsova et al., 1996; Florinsky 1998). Es posible calcular las primeras depresiones o cuencas dentro de los MED y se debe especificar una o varias reglas para determinar las direcciones de drenaje y la conectividad de los elementos individuales con el fin de calcular el camino de flujo y las longitudes de los riachuelos que contribuyen a las áreas de drenaje (por ejemplo, Jenson y Domingue, 1988; Martz y De Jong, 1988). El objetivo general es ser capaz de utilizar estos atributos para describir la morfometría del área de captación de los drenajes y la posición de los atributos, la superficie de las laderas y canales de corriente que comprende los drenajes de las cuencas, entre otros. Diferentes autores (Speight, 1974, 1980; Jenson y Domingue, 1988; Giles et al., 1998, y Burrough et al., 2000, entre otros) han utilizado los cálculos de los atributos topográficos para generar clasificaciones formales de la superficie terrestre. (Wilson y Gallant, 2000)

**Tabla 3.1** Atributos Topográficos Primarios que pueden ser calculados por El Análisis de Terreno de los Datos (Dem). Tomado de Moore, Grayson y Ladson (1991). (Wilson y Gallant, 2000)

ATRIBUTO	DEFINICION	SIGNIFICADO
Altitud	Elevación	Clima, vegetación y energía potencial
Aspecto de altura cuesta arriba	La altura promedio del área cuesta arriba	Energía potencia
Aspecto	Pendiente azimutal	Insolación solar, evotranspiracion, distribución y abundancia de flora y fauna
Pendiente	gradiente	Velocidad de flujo superficial y sub-superficial, tasa de escurrimiento, precipitación, vegetación, geomorfología, contenido de agua en el suelo (% de humedad), tipo de suelo competente.
Pendiente cuesta arriba	Pendiente media del área cuesta arriba	Velocidad de escurrimiento
Pendiente de dispersión	Pendiente media del área dispersa	Tasa de drenaje del suelo
Pendiente de captación	Pendiente promedio de la cuenca	Tiempo de concentración
Área cuesta arriba	Área de captación encima de un tramo corto de contorno	Volumen de escorrentía, estado estacionario de la tasa de escorrentía
Área dispersa	Área pendiente debajo de una longitud corta de contorno	Tasa de drenaje del suelo
Área de captación (cuenca)	Área de drenaje a la salida de la cuenca	Volumen de escorrentía
Área específica de la cuenca	Área cuesta arriba por unidad de ancho de contorno	Volumen de escorrentía, estado estacionario de la tasa de escorrentía, características del suelo, contenido de agua en el suelo (% de humedad) y geomorfología
Longitud de la trayectoria de flujo	Máxima distancia del flujo de agua a un punto en la cuenca	Las tasas de erosión, tiempo de concentración y acumulación de sedimentos
Longitud de la cuesta arriba	Longitud promedio de los modelos de flujos hasta un punto en la cuenca	Tasas de erosión, aceleración de flujos
Longitud dispersa	Distancia a un punto a las afueras de la cuenca	Impedancia (resistencia) del drenaje del suelo
Longitud de la cuenca	Distancia del punto más alto de las afueras de la cuenca	Atenuación del flujo superficial
Perfil de curvatura	Pendiente del perfil de curvatura	Aceleración de flujo, tasa de erosión/depositación y geomorfología
Plano de curvatura	Contorno de curvatura	Convergencia/divergencia de flujo, contenido de agua del suelo (% de humedad), características del suelo.
Curvatura tangencial	Plan de curvatura múltiple para pendientes	Proporciona la medida alternativa de convergencia y divergencia del flujo local
Proporción de elevación	Proporción de la celdas definida por el usuario, el círculo más bajo del centro de la celda.	Posición relativa del paisaje, distribución y abundancia de flora y fauna.

Los atributos secundarios se calculan a partir de dos o más atributos primarios, estos se resumen en la Tabla 3.2 los mismos resultan muy importantes, debido a que ofrecen la oportunidad de describir el patrón como una función de proceso. Esos

atributos que cuantifican el papel desempeñado por la topografía en la redistribución de agua a través del paisaje y en la modificación de la cantidad de radiación solar recibida en la superficie, tienen importancia de tipo: hidrológica, geomorfológica y ecológica, e importantes consecuencias en la evolución de muchos paisajes. Estos atributos pueden afectar a las características del suelo (Porque la pedogénesis de la catenaria del suelo está afectada por la forma en que el agua se mueve a través del entorno en muchos paisajes), la distribución y la abundancia de agua en el suelo, la susceptibilidad a la erosión por el agua de los paisajes, y la distribución y abundancia de flora y fauna. A continuación se presentarán las expresiones matemáticas de los atributos secundarios utilizados en este trabajo (Wilson y Gallant, 2000):

**Tabla 3.2** Características topográficas secundarias que puede ser calculado mediante el análisis digital del terreno a partir del modelo de elevación digital (MED) (Moore, Grayson y Ladson, 1991 en Wilson y Gallant, 2000)

ATRIBUTOS	DEFINICION	OBJETIVO
Índices de humedad topográfica	$W_T = \ln\left(\frac{A_S}{T \cdot \tan(\beta)}\right)$	Esta ecuación asume las condiciones de estado estacionario y describe la distribución espacial y las extensiones de las áreas de saturación (por ejemplo áreas de fuentes variables) por la formación de escorrentías en función del área de contribución cuesta arriba, trasmisividad del suelo y gradiente de la pendiente.
	$W = \ln\left(\frac{A_S}{\tan(\beta)}\right)$	Esta ecuación en particular asume las condiciones del estado estacionario y las propiedades del suelo uniforme (por ejemplo la trasmisividad es constante a través de la captura e igual a la unidad)
Índice potencial del río	$SPI = A_S \tan(\beta)$	Mide la potencia erosiva de la corriente de agua basado en el supuesto que la descarga (caudal) es proporcional al área de cuenca específica ( $A_S$ ). Predice la erosión neta en el área del perfil de convexidad y la concavidad tangencial. (las zonas de convergencia y aceleración de flujo) y la disposición neta en áreas de perfil cóncavo (zonas de disminución de la velocidad de flujo)
	$LS = (m + 1) \left(\frac{A_S}{22.13}\right)^m \left(\frac{\sin(\beta)}{0.0896}\right)$	Índice de capacidad de transporte de sedimentos, se derivó de la teoría de la unidad de potencia de drenaje y es equivalente al factor longitud de pendiente. En ciertas circunstancias, la ecuación universal revisada de pérdida de suelos. Otra forma a veces de utilizar esta ecuación es para predecir los lugares de erosión neta y las áreas netas de depositación
	$CIT = A_S [\tan(\beta)]^2$	La variación del índice de potencia de flujo, a veces se utiliza para predecir la ubicación de las cabeceras de los arroyos de primer orden, es decir; canal de iniciación

### 3.1.6 Otros cálculos adicionales

Adicionalmente a los atributos mostrados en la Tabla 3.2 puede calcularse a lo largo de la zona de estudio otras aplicaciones hidrológicas, como por ejemplo: cálculo

de la red de drenajes, morfometría de la cuenca, puntos de captura, acumulación de flujo, dirección de flujo, orden de Strahler, y orden de Shreve, entre otros, la Tabla 3.3 resume los algunos cálculos morfométricos que pueden ser realizados para cada una de las cuencas analizadas en el presente trabajo.



**Tabla 3.3** Cálculos de variables y parámetros morfométricos de la microcuenca y la red de drenaje. (Tomado de Gardiner, 1981; Gregory y Walling, 1973; Guevara y Cartaya, 1991; Henao, 1998; Horton, m 1945; Leopold et al., 1964; Monsalve, 2000; Pastrana, 2003; Pérez, 1977; Senciales, 1998; Smith y Stopp, 1978; Strahler, 1968; Strahler, 1985 en Arcia y Viana, 2013)

VARIABLE	PARAMETRO	SOMBOLO	ECUACION	DIMENSION
Escala de la cuenca	Área	A	-	L <sup>2</sup>
	Perímetro	P	-	L
	Longitud	L	-	L
	Ancho	W	-	L
	Diámetro	D	$D = \left(\frac{4A}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}$	L
Gradiente y forma del relieve de la cuenca	Altura máxima	H	-	L
	Altura mínima	h	-	L
	Relieve máxima	H <sub>b</sub>	H <sub>b</sub> = H - h	L
	Radio del relieve	R	$R = \frac{H_B}{L}$	-
	Pendiente mediana	S <sub>md</sub>	Construcción grafica	%
	Pendiente media del perfil longitudinal de la corriente principal	S <sub>m</sub>	$S_m = \left(\sum \sqrt{\frac{S_{mi}}{m}}\right)^2$ S <sub>mi</sub> <sup>(1)</sup> m <sup>(2)</sup>	%
Forma de la cuenca	Elongación	S <sub>C</sub>	$S_C = \frac{A^{0.5}}{L}$	-
	Factor forma	F <sub>F</sub>	$F_f = \frac{A}{L^2}$	-
	Coefficiente de compacidad	K <sub>C</sub>	$K_C = \frac{P}{A^{1/2}} \cdot 0,28$	-
Extensión de la red de drenaje	Longitud de la corriente principal	L <sub>cp</sub>	-	L
	Longitud total de las corrientes	C <sub>L</sub>	$C_L = \sum \text{longitud de las corrientes}$	L
	Densidad de drenaje	D <sub>d</sub>	$D_d = \frac{C_1}{A}$	$\frac{L}{L^2}$
Orden y magnitud de la red de drenaje	Orden de la corriente	U	-	-
	Numero de segmentos de la corriente de un orden dado	Un	-	-
	Relación de bifurcación	R <sub>b</sub>	$R_b = \frac{N_u}{N_{u+1}}$	-
	Longitud de la corriente de un orden dado	L <sub>u</sub>	-	L
	Longitud total de la corriente de un orden dado	L <sub>tu</sub>	$L_{tu} = \sum L_u$	L
	Longitud media de la corriente de un orden dado	L <sub>mu</sub>	$L_{mu} = \frac{L_{tu}}{N_u}$	L
	Longitud media acumulada de la corriente de un orden dado	L <sub>mau</sub>	$L_{mau} = L_{mu} + L_{mu+1}$	L
	Relación de longitud	R <sub>L</sub>	$R_L = \frac{L_{mu}}{L_{mu+1}}$	-
	Corriente de torrencialidad	CT	$CT = \frac{N_L}{A}$	-

Donde  $S_{mi}$  = pendiente media de cada intervalo del perfil longitudinal de la corriente principal;  $m$  = número de intervalos en que se divide el perfil longitudinal de la corriente principal y  $N_L$  = número de corrientes de orden 1. Para realizar todos estos cálculos de todos los atributos tanto primarios como secundarios del terreno y

también los cálculos hidrológicos se usará el Sistema de Información Geográfico (SIG), llamado ArcGIS 10.3 y Matlab 16 version 2017.

### **3.1.7 Atributos Morfométricos de las Cuencas Hidrográficas**

Al conocer los elementos morfométricos que definen a una cuenca hidrográfica, se pueden establecer una serie de parámetros de evaluación del comportamiento morfodinámico e hidrológico del sistema, que junto con la interacción de las variables exodinámicas, son los responsables de originar y/o activar procesos geomorfológicos de una zona en particular. (Figueira y Romero, 2014)

Los tres elementos básicos para definir la morfología de una cuenca son la forma, el relieve y la red de drenaje, los cuales pueden definirse considerando diferentes patrones, parámetros o elementos de cálculo fisiográfico. (Figueira y Romero, 2014)

3.1.7.1 Para el presente estudio se tomaron en cuenta los siguientes factores (Figueira y Romero, 2014):

- ✓ Forma: Área de drenaje, perímetro, índice de Gravelius o coeficiente de capacidad, factor de forma.
- ✓ Relieve: altura media, pendiente, coeficiente de masividad y coeficiente orográfico, curva hipsométrica.
- ✓ Red de Drenaje: patrones de drenaje.

3.1.7.2 Características que definen la forma

- ***Área de la cuenca o de drenaje***

Corresponde a la proyección horizontal delimitada por las divisorias de agua. Este parámetro es determinante en la magnitud de varios fenómenos hidrológicos tales como, el volumen de agua que ingresa por precipitación, la magnitud de los caudales, entre otros. La Tabla 3.4 se presentan las características de las mismas según su área. (Figueira y Romero, 2014)

**Tabla 3.4.** Clasificación de las cuencas de acuerdo a su extensión superficial (tomado de DOMÍNGUEZ- CORTÁZAR, 2003 en Figueira y Romero, 2014)

Area (km <sup>2</sup> )	Clasificación
< 25	Microcuenca
25 - 250	Pequeña
250 - 500	Intermedia pequeña
500 - 2500	Intermedia grande
2500 - 5000	Grande
>5000	Muy grande

- ***Perímetro***

Está representado por la longitud en proyección horizontal de la divisoria de agua que envuelve a la cuenca. (Figueira y Romero, 2014)

- ***Índice de compacidad (Kc) o de Gravelius***

Es un número adimensional que varía con la forma de la cuenca, y se define como el cociente entre el perímetro de la cuenca y la longitud de una circunferencia de área igual al área de la cuenca. (Figueira y Romero, 2014)

$$Kc = 0,28 P/\sqrt{A} \quad (\text{Ec.3.1})$$

*En donde:*

*Kc* es el coeficiente de compacidad y carece de unidades

*P* es el perímetro en metros

*A* es el área de la cuenca en metros cuadrados

Este parámetro permite idealizar la cantidad de escorrentía para un área e intensidad de lluvia, siendo la respuesta hidrológica más rápida en cuencas con coeficientes de compacidad cercanos a la unidad. Cuanto más irregular la forma de la cuenca su coeficiente será mayor. (Figueira y Romero, 2014)

Las formas alargadas de la cuenca tienden a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente crecidas, a diferencia de formas más ensanchadas en donde se deben recorrer varios cauces secundarios que disminuyen la velocidad de la escorrentía (Ver Tabla 3.5)

**Tabla 3.5.** Valores de Índice de Capacidad (tomado de MÁRMOL, L. 2008 en Figueira y Romero, 2014)

Kc	Clases de forma
1 – 1,25	Casi redonda a oval redonda
1,25 – 1,50	A oval oblonga
1,50 – 1,75	A rectangular oblonga
>1,75	A casi rectangular (alargada)

- **Factor Forma (Kf)**

Este índice, propuesto por Gravelius, se estima a partir de la relación entre el ancho promedio del área de captación y la longitud de la cuenca, longitud que se mide desde la salida hasta el punto más alejado a ésta. (Fuentes, J. 2004)

El factor de forma (Kf), viene dado por:

$$Kf = \frac{B}{L} \tag{Ec. 3.2}$$

Donde:

B: Ancho promedio del área de captación

L: Longitud de la cuenca 1

A: Área de captación

El ancho promedio B se estima como:

$$B = \frac{A}{L} \tag{Ec. 3.3}$$

Luego:

$$Kf = \frac{\frac{A}{L}}{L} = \frac{A}{L^2} \tag{Ec. 3.4}$$

Este factor relaciona la forma de la cuenca con la de un cuadrado, correspondiendo un  $K_{f=1}$  para regiones con esta forma, que es imaginaria. (Fuentes, J. 2004)

Un valor de  $K_f$  superior a la unidad nos proporciona el grado de achatamiento de la cuenca o el de un río principal corto. En consecuencia, con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas. (Ver Tabla 3.6) (Fuentes, J. 2004)

**Tabla 3.6** Valores del factor forma (Fuentes, J. 2004)

<b>Clases de valores de forma</b>	
<b>Rangos de <math>K_f</math></b>	<b>Clases de forma</b>
.01-.18	Muy poco achatada
.18-.36	Ligeramente achatada
.36-.54	Moderadamente achatada

### 3.1.7.3 Características que definen el relieve

- ***Elevación***

Es la altura de un punto de la Tierra con relación al nivel del mar. Este parámetro es de gran importancia para entender la complejidad topográfica que puede presentar una cuenca. (Figueira y Romero, 2014)

- Elevación mínima:** es el valor de la cota más baja de la cuenca, usualmente el punto de salida o desfogue de la misma.
- Elevación máxima:** es el valor de la cota más alta presente en la cuenca.
- Elevación media:** es el promedio de las elevaciones existentes en la cuenca.

- ***Índice o Coeficiente de masividad ( $K_m$ )***

Este coeficiente indica qué tan plana o accidentada es una cuenca, factor que sin duda interviene en el comportamiento hidrológico de la misma. Está expresada por la relación entre la elevación media de la cuenca y su superficie. (Figueira y Romero, 2014)

$$K_m = \text{Elevación media (m)} / \text{Área (km}^2\text{)} \quad (\text{Ec.3.5})$$

Este valor toma valores bajos en cuencas montañosas y altos en cuencas llanas (ver Tabla 3.7)

**Tabla 3.7.** Clasificación de una cuenca en función de su coeficiente de masividad. (Figueira y Romero, 2014).

Rangos de Km	Clases de masividad
0 - 35	Muy montañosa
35 - 70	Montañosa
70-205	Relativamente plana
>205	Plana

### 3.1.8 Perfiles longitudinales

El perfil longitudinal es una curva obtenida entre la altura (H) y la distancia corriente abajo (L) de un canal (Doranti et al., 2014). Desviaciones de la concavidad en los perfiles longitudinales de los ríos puede indicar un estado de inestabilidad de canales debido a perturbaciones tectónicas, climáticas o de tipo de roca. En particular segmentos convexos pueden ser investigados para evaluar perturbaciones tectónicas a diferentes escalas desde toda la cadena o estructuras locales (Doranti et al., 2014).

De acuerdo a Castillo et al. (2015), el análisis de los perfiles longitudinales de los ríos ha demostrado ser una herramienta útil en los estudios de la evolución del relieve (Wobus et al., 2006) aunque su uso se ha centrado más en demostrar la presencia del equilibrio dinámico (e.g., Montgomery, 2001; Stolar et al., 2007; Cyr et al., 2010), detectar zonas sujetas a forzamientos tectónicos o a evaluar la propagación de knickpoints a consecuencia del incremento en las tasas de levantamiento (Duvall et al., 2004; Harkins et al., 2007; Attal et al., 2008; Finnegan et al., 2008; Attal et al., 2011). Diversos estudios indican que los ríos son elementos del relieve sensibles al incremento en las tasas de levantamiento tectónico, proceso que resulta en un aumento del gradiente topográfico fluvial (e.g., Kirby y Whipple, 2001; Snyder et al., 2003; Duvall et al., 2004) así como de la propagación de formas transitorias conocidas como *knickpoints* (Castillo y Lugo-Hubp, 2011), estos indicarían la caída del nivel de base de relieve producida por el levantamiento de un volumen de roca determinado (Bishop, 2007).

A medida que el área de drenaje se hace más grande disminuye la pendiente, esto se modela partir de la siguiente ecuación (Castillo et al., 2015):

$$S = k_s A^{-\theta} \quad (3.6)$$

Donde  $S$  es la pendiente del canal,  $k_s$  es el índice de verticalidad del canal,  $A$  corresponde al área de drenaje y  $\theta$  es la concavidad del canal. La ecuación (3.6) es válida hasta  $\sim 10^5 \text{ m}^2$  de área de drenaje ya que existe un área crítica ( $A_c < 10^5 \text{ m}^2$ ) donde predominan los procesos de ladera sobre los fluviales (Montgomery y Foufoula-Georgiou, 1993). El área crítica puede variar en función de las condiciones climáticas, de tal forma que ésta puede ser mayor en zonas áridas o disminuir en zonas más lluviosas (Montgomery y Dietrich, 1988). El desarrollo de la concavidad en el perfil longitudinal a partir de un área mayor de drenaje (*i.e.*  $> 10^5 \text{ m}^2$ ) sugiere que los procesos de ladera, como son los flujos de derrubios, operan sobre un área más extensa con respecto a otros ambientes montañosos, donde el cambio entre los procesos fluviales con respecto a los de ladera es  $10^5 \text{ m}^2$  de área de drenaje (Montgomery, 2001). Por otro lado, los valores de  $\theta$  se encuentran en un estrecho rango de entre  $\sim 0,30$  a  $\sim 0,60$  (Whipple y Tucker, 1999), sin embargo, estos pueden aumentar hasta el orden de la unidad debido a la propagación de señales tectónicas o a la presencia de forzamientos climáticos (Schoenbohm et al., 2004; Trauerstein et al., 2013). En algunos sistemas montañosos se ha observado que la presencia de valores de  $\theta$  altos ( $\theta > 0,6$ ) en áreas de drenaje  $> 10^5 \text{ m}^2$  denotan altas tasas de incisión por la influencia de la precipitación, la presencia de un rápido levantamiento tectónico o la combinación de ambas (*e.g.*, Trauerstein et al., 2013 en Castillo et al., 2015)

La Ecuación (3.6) es válida donde las pendientes de los canales se encuentran al mismo nivel del sistema erosivo, es decir, que el sistema fluvial se encuentra en equilibrio dinámico (Whipple y Tucker, 1999; Castillo et al., 2015). Cuando existen cambios debidos a un levantamiento tectónico, forzamiento climático o a la litología, la relación entre las pendientes y área de drenaje cambia, lo cual puede incrementar el valor de  $k_s$  o producirse una ruptura en el escalamiento de la ecuación (3.6), lo que corresponde normalmente con la presencia de *knickpoints* (*e.g.*, Snyder et al., 2003;

Schoenbohm et al., 2004; Whipple, 2004; Bishop et al., 2005; Wobus et al., 2006; Castillo et al., 2013; Trauerstein et al., 2013). Al momento de emplear la ecuación (3.6) es importante tener en cuenta que  $k_s$  guarda una estrecha relación con  $\theta$ , por lo tanto, es recomendable normalizar el índice de verticalidad para romper la covarianza y facilitar la comparación entre los distintos ríos de un sistema montañoso determinado (Sklar y Dietrich, 1998; Kirby et al., 2003; Wobus et al., 2006).

En distintos ambientes, se ha observado que el índice normalizado de la verticalidad de los canales o valor  $k_{sn}$  (Wobus et al., 2006) guarda una buena correlación con las tasas de levantamiento tectónico (*e.g.*, Cyr et al., 2010) y con la erosión (*e.g.*, Safran et al., 2005; DiBiase et al., 2010; Kirby y Whipple, 2012), esta última se relaciona con el relieve local (Ahnert, 1970; Montgomery y Brandon, 2002; Safran et al., 2005) y con las pendientes medias de las cuencas (Binnie et al., 2007; Ouimet et al., 2009), por lo tanto los valores  $k_{sn}$  pueden utilizarse como indicadores robustos de procesos tectónicos y erosivos a nivel del canal y a lo largo de la cuenca (Castillo et al., 2015).

Otro uso alternativo de la Ecuación (3.6) consiste en linealizar los perfiles longitudinales con una concavidad determinada e integrar el área de drenaje para producir las coordenadas  $\chi$  o el denominado gráfico tipo *Chi* (Perron y Royden, 2013; Royden y Perron, 2013). En el gráfico *Chi* el ajuste de la topografía a los procesos erosivos está dado por la linealidad entre la distancia  $\chi$  y la elevación observada en el canal, de tal forma que los forzamientos tectónicos se detectan por un incremento en la verticalidad de la línea en el gráfico *Chi* o por rupturas en la propia linealidad (Perron y Royden, 2013). En los casos donde existe un equilibrio dinámico, la relación en el gráfico *Chi* está dada por una linealidad en el perfil, cuando existe un incremento en las tasas de levantamiento tectónico la pendiente de la línea en el gráfico *Chi* aumenta (Perron y Royden, 2013). Los cambios en la verticalidad de los perfiles del gráfico *Chi* son indicativos del control que ejerce la litología frente a los procesos erosivos, en los cuales el sistema fluvial presenta distintos ajustes (Hack, 1973)



### 3.1.9 Análisis Hipsométrico

Análisis hipsométrico, o la relación de drenaje de la sección transversal horizontal del área de la cuenca a la elevación, fue desarrollado en formas sin dimensiones modernas por Langbein y otros (1947). Mientras este autor lo aplico cuencas grandes, ha sido desde entonces aplicado a cuencas de drenaje pequeñas de bajo orden para determinar como la masa es distribuida dentro de una cuenca de base a tope. (Strahler, 1952; Miller, 1953; Shumm, 1956; Coater, 1956 en Strahler, 1957)

La Figura 3.8, ilustra la definición de las dos variables sin dimensión involucrada. Tomando la cuenca de drenaje a ser limitada por los lados verticales y un plano base horizontal pasando a través de la desembocadura, la altura relativa es el radio de altura de un contorno dado  $h$  a una altura de la cuenca total  $H$ . el área relativa es el radio área de sección transversal horizontal  $a$  al área de la cuenca entera  $A$ . la curva hipsométrica de porcentaje es un gráfico de la función continua relacionando la altura relativa  $y$ , con un área relativa  $x$ . (Strahler, 1957)

Mientras que el diagrama de la derecha inferior de la Figura 3.8, muestra la forma de la variación de la curva hipsométrica en etapas geológicas temprana de desarrollo de cuencas de drenaje, pero una vez habiendo alcanzado un equilibrio, o etapa madura (curva media en el gráfico), tiende a variar poco después de eso. Varios atributos sin dimensión de la curva hipsométrica son medibles y pueden ser usados para propósitos comparativos. Esto incluye la integral o área relativa por debajo de la curva, la pendiente de la curva en su punto de inflexión, y el grado de sinuosidad de la curva. Muchas curvas hipsométricas parecen estar cercanamente ajustadas por la función del modelo mostrado en la esquina izquierda inferior de la Figura 3.8, sin embargo, ninguna base racional o mecánica es conocida para la función. (Strahler, 1957)

Ahora que la curva hipsométrica ha sido graficada para cientos de cuencas pequeñas en una amplia variedad de regiones y condiciones, es posible observar la extensión a la cual las variaciones ocurren. Generalmente las propiedades de la cuerva tienden a ser estables en masas de rocas homogéneas y para adherirse

generalmente a la misma familia de curvas para una combinación geológica y climática dada. (Strahler, 1957)

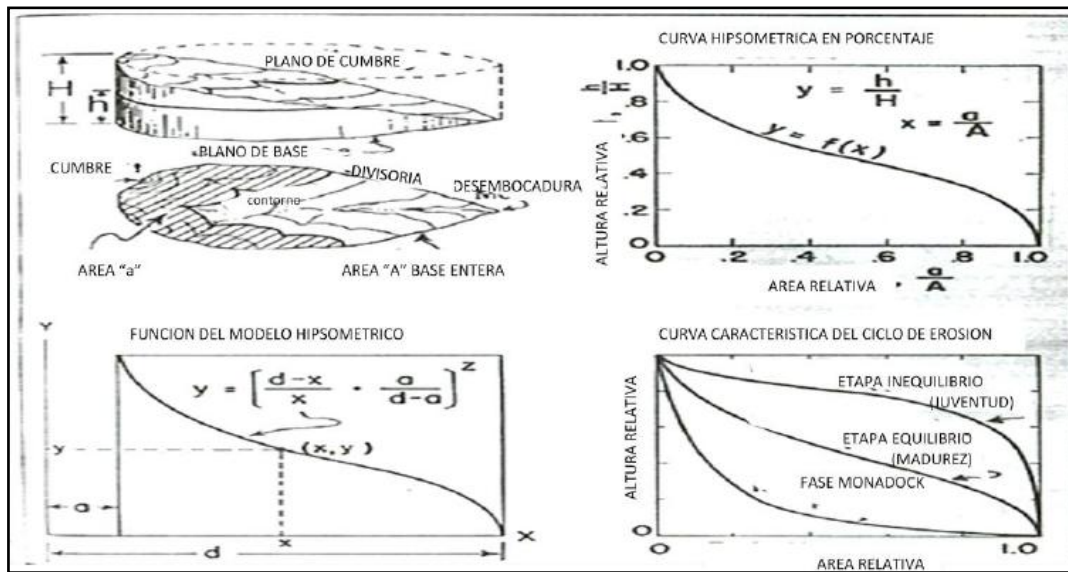


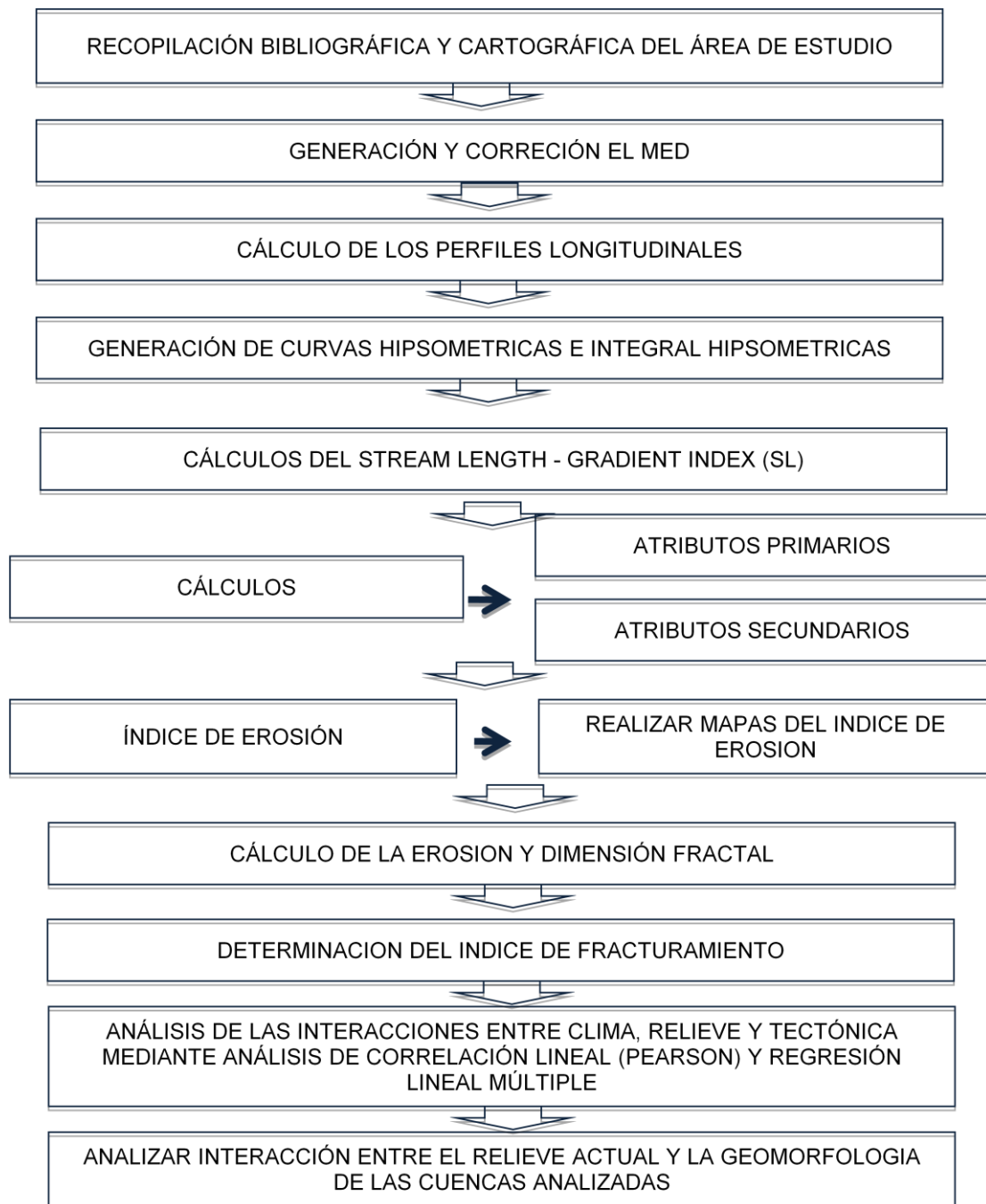
Figura 3.8 Método de análisis hipsométrico. (Strahler, 1954a. p.353 en Strahler, 1957)

## **CAPITULO IV**

### **METODOLOGÍA**

La metodología utilizada en esta tesis de maestría se resume en el diagrama de flujo de la Figura 4.1. Donde primero se empieza por una recopilación bibliográfica y cartográfica. Seguidamente se realiza y proyecta el modelo de elevación digital, luego realizar el perfil longitudinal de los ríos tributarios en la zona central de la cuenca del río Orinoco, sobre este perfil longitudinal se le calcula el Stream – Gradient Index (SL), posteriormente se calcula los atributos topográficos primarios y secundarios, posteriormente el índice de erosión y se realizan los mapas, también se calcula un índice de fracturamiento o fallamiento, y finalmente mediante análisis de correlación se discrimina la interacción entre el relieve, clima, litología y tectónica con las características de la subcuencas de los ríos tributarios en la zona central de la cuenca del río Orinoco.

Básicamente la metodología utilizada se basó en el uso de programas computarizados capaces de procesar una gran cantidad de datos derivados de análisis geomorfológicos. Se utilizaron los siguientes programas: ArcGIS 10.3, Matlab R2015b, Global Mapper15, otros códigos especializados desarrollados para tal fin como Topotoolbox, ProfilerToolbar v5.1



**Figura 4.1** Flujoograma de actividades

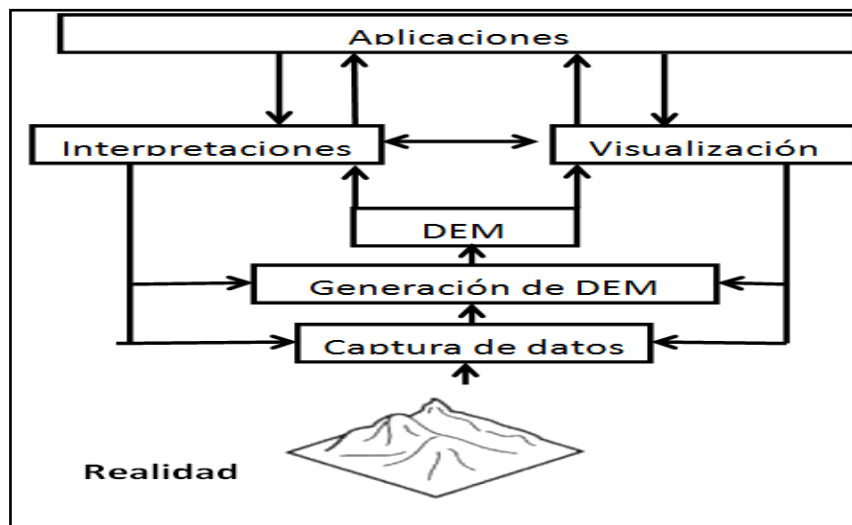
#### **4.1 RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y CARTOGRÁFICA.**

Se empezó por recolectar toda la información bibliográfica relacionada con el área de estudio, la cual abarco los ríos tributarios de la zona central de la cuenca del

río Orinoco los cuales son Cuchivero, Caura y aro al sur; Manapire, Zuata y Pao al norte.

## 4.2 GENERACIÓN Y CORRECCIÓN DEL MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL (MED)

Para generar el MED fue necesario obtener los datos de elevación (a través de la página <https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>). Para la definición del relieve se generó un MED a partir de los datos SRTM-1arc-segundos. La variable recogida en este caso fue la de elevación como fue referido anteriormente. Luego en el programa ArcGIS se aplicó distintas operaciones al MED existentes en el módulo de “hidrology” como lo son las herramientas: “fill”, “flow Direction”, flow Accumulation y “basin” esta última permitió definir la línea divisoria que se expresa mostrando la forma cuenca; también fue obtenida la red de drenaje a partir de este MED a partir de la herramienta de “Flow accumulation”. (Figura 4.2)



**Figura 4.2** Las principales tareas asociadas con el modelado del terreno digital. (Wilson y Gallant, 2000)

### 4.2.1 Corrección del MED (relleno o "fill")

Antes de procesar un MED es necesario identificar errores dentro del mismo, esto se hace mediante la herramienta canal o "channel", depresión o "sink" existentes

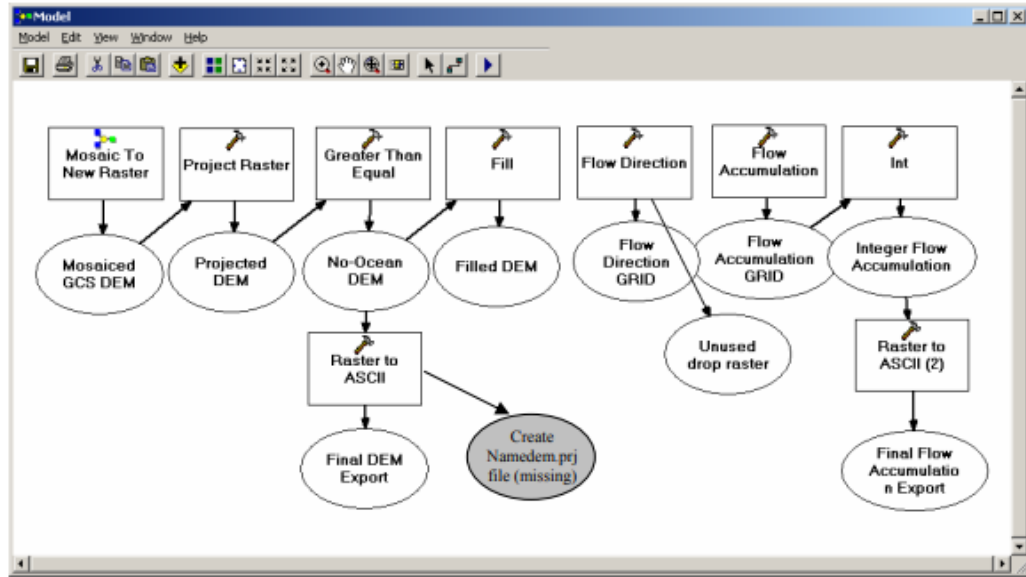
en las herramientas de análisis espacial de ArcGIS 10.3. En algunas ocasiones es necesario hacer otro tipo de correcciones a los modelos de elevación digital y estudiar la sensibilidad de los cálculos a los distintos modelos.

#### **4.3 OBTENCIÓN DEL PERFIL LONGITUDINAL DE LOS RÍOS TRIBUTARIOS**

Para la realización del perfil longitudinal se utilizó el MED, ya que contiene los datos de elevación del terreno. Son perfiles de elevación vs longitud del río. Los ríos que fueron analizados son: al sur los ríos Caura, Cuchivero y Aro; al norte Manapire, Zuata y Pao. Estos ríos tienen una longitud mayor a 10 km.

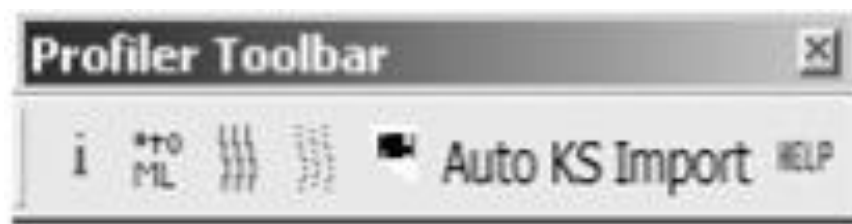
Se descargó e instaló la herramienta Profiler Toolbar de ArcGIS desarrollada por Whipple (2007). Posteriormente a través del programa Global Mapper se descargó la información espacial de SRTM Worldwide Elevation Data (con una resolución de 3-arc-segundos). Esta información fue exportada al programa ArcGIS 10.3., para obtener la acumulación de flujo de distintas áreas de estudio. Para utilizar el matlab con el profiler toolbar es necesario que tanto el DEM como la acumulación de flujo estén en formato de archivos de texto (.txt), lo cual se logra con el programa ArcGIS convirtiendo de Raster a ASCII. Estos archivos fueron almacenados en una carpeta de rápido acceso para mejor utilización del programa.

La Figura 4.3 ilustra en diagrama de flujos la obtención de los rasters, el cálculo de la acumulación de flujo y su conversión en formato de texto.



**Figura 4.3** Pasos para crear los archivos .txt en ArcGIS

Mediante el comando `“arcdemtxt2matlab('matlab_directory','file_name')”` se convirtieron los archivos .txt en archivos .mat. Luego volviendo a ArcGIS se ubicaron las cabeceras de cada río con el programa Profiler Toolbar y estos fueron almacenados en archivos en la misma carpeta de Matlab creada anteriormente. En la Figura 4.4 se muestra los distintos comandos que integran la barra de herramientas del programa profiler de Whipple.



**Figura 4.4** Herramienta Profiler toolbar en ArcGIS

Con la obtención de estos datos es posible pasar al cálculo en Matlab para obtener los perfiles. Se utilizó el comando: `“profile51('file_name', 'arcmap_directory', 'matlab_directory', 'n');”` para obtener los perfiles. En estos perfiles se calculó valores de ksn y concavidad, así como también se seleccionaron knickpoints (puntos de inflexión). Todos estos datos se almacenaron en la carpeta directorio de Matlab, para luego volver a ArcGIS y seleccionar los datos de

knickpoints. Con este propósito se abrió el archivo “**knick\_río**” que arroja Matlab en el programa ArcGIS utilizando la herramienta graficar puntos XY.

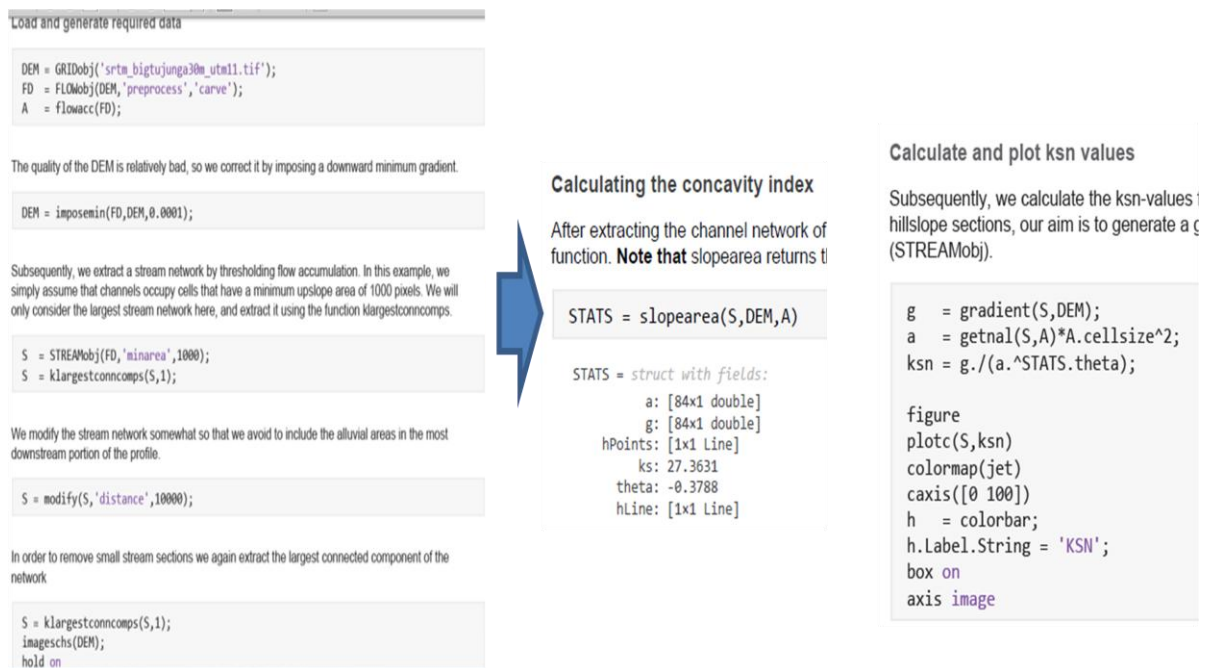
Para los valores de  $k_{sn}$  se utilizó la herramienta llamada Topo Toolbox 2.2 (Schwanghart, W., Scherler, D. 2014) este junto con el Matlab recrea todos los pasos realizados entre ArcGIS y Matlab para crear los perfiles (ver Figura 4.5), solo que en este caso todo se hace con comandos en el programa Matlab. Se carga el DEM y partir del mismo se hace la acumulación de flujo y la pendiente, con esto se calculan los valores de  $k_{sn}$  que luego son ploteados en un mapa para su análisis.

Con los datos obtenidos de los perfiles longitudinales se evaluó la relación entre la pendiente y el área de drenaje con el método propuesto por Wobus et al., (2006), se utilizó una concavidad de referencia ( $\theta_{ref}$ ) de 0.45 en la Ecuación (4.1) para facilitar la comparación entre los distintos ríos que inciden en la cuenca, así como los cambios en los distintos tramos de un mismo río. Por la relación que existe entre valores  $k_{sn}$  con las tasas de erosión (Kirby y Whipple, 2012), los valores altos de  $k_{sn}$  indican, en la mayoría de los casos, zonas donde se presupone que existe una mayor incisión, y zonas donde existe una litología resistente frente a la erosión fluvial, en cuyo caso los valores de  $k_{sn}$  son bajos. Con el objeto de estimar la verticalidad de los canales se estimó el valor medio  $k_{sn}$  para cada uno de los ríos. (Castillo et al., 2015)

$$k_{sn} = \frac{S}{A^{-\theta}} \quad (4.1)$$

Donde  $k_{sn}$  se refiere a la verticalidad del canal normalizado y  $\theta$  a la concavidad del canal.



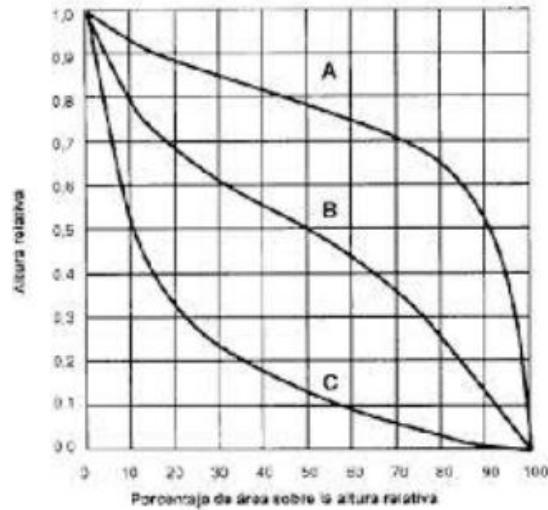


**Figura 4.5** Pasos para la creación de mapa ksn con topo toolbox

### 4.3.1 Análisis hipsométrico

La curva hipsométrica representa de forma gráfica las elevaciones del terreno en función de las superficies correspondientes, y define el potencial evolutivo de la cuenca, pudiendo distinguir tres posibles etapas o fases, una de juventud (A), de madurez (B) y de vejez o senectud (C). (Figuera y Romero, 2014)

- a) Curva A: es una cuenca en etapa de desequilibrio, con valles profundos y praderas amplias, geológicamente joven o una cuenca de meseta.
- b) Curva B: es una cuenca en etapa de equilibrio, geológicamente madura o una cuenca de montaña.
- c) Curva C: es una cuenca erosionada o con valles extensos y cumbres escarpadas. (Figuera y Romero, 2014)



**Figura 4.6** Clasificación de una cuenca en base a su curva hipsométrica

La construcción de esta curva se realiza mediante el cálculo del área entre curvas de nivel y la superficie acumulada, en función de una cota. (Figuera y Romero, 2014)

Strahler (1952) diviso una integral hipsométrica tridimensional (*HI*) para analizar la cantidad relativa de superficie de tierras altas en una cuenca de drenaje para caracterizar y comparar etapas relativas de desarrollo entre cuencas. El afirma (1952, p.119) que la *HI* expresa simplemente la manera en la cual el volumen que yace por debajo de la superficie del terreno es distribuido de base a tope. (Mckeown, et al., 1807)

El valor *HI* provee una medición de la erosión de la cuenca mientras que métodos de dos dimensiones provee medidas del suelo por debajo del curso de un río. (Mckeown, et al., 1807) o una forma de ver la incisión fluvial.

Cuando las curvas hipsométricas presentan variaciones, ya sea por apartarse de las teóricas o por presentar más de un punto de inflexión, ello puede relacionarse con controles tectónicos o litológicos. El valor del área relativa que yace bajo la curva (integral hipsométrica) es indicativo del estado de desarrollo de la cuenca; valores superiores al 60 % indican desequilibrio manifiesto en el funcionamiento de la cuenca (juventud en el sentido Davisiano), valores rondando el 47 % representan equilibrio

(madurez), e inferiores a 30% implican fase de “monadnock” (senectud). (Racca, 2007)

Con la ayuda de ArcMap (ArcGIS Desktop), se extrajo las curvas hipsométricas para las cuencas de drenaje de los tributarios de la zona central del río Orinoco mediante la reclasificación del MED generando los datos necesarios como áreas entre curvas y elevación de cada zona. Con estos datos se calculo en una hoja de Excel el porcentaje (%) de área acumulada y los valores de elevación promedio entre cada curva. Lo que permitió generar la curva hipsométrica.

Luego se procede a calcular la integral hipsométrica. La integral hipsométrica no es más que el área bajo la curva hipsométrica, calculando la integral hipsométrica para una sola área de captación puede ser simplificado notando que el área bajo la curva es igual al área de un rectángulo el cual está entre 0 y 1 en el eje x (área relativa) y 0 a la elevación promedio relativa (eje y). Por lo tanto la única variable es la elevación relativa promedio de un área de captura. La solución de distribución espacial para la integral hipsométrica presentada en este trabajo entonces usa la normalización (Brocklehurst y Whipple, 2004 en Cohen, Willgoose y Hancock, 2008)

$$HI = \frac{\bar{Z} - Z_0}{Z_{max} - Z_0} \quad (4.2)$$

Donde HI es la integral hipsométrica,  $Z_{max}$  es la elevación máxima del área de captura,  $\bar{Z}$  es la elevación promedio y  $Z_0$  es la elevación mínima. (Brocklehurst y Whipple, 2004 en Cohen, Willgoose y Hancock, 2008)

#### **4.4 OBTENCION DE LOS INDICES “STREAM – GRADIENT INDEX (SL)”**

La litología parece influenciar los parámetros fluviales de ciertos ríos. Ejemplos incluyen el aumento en valores de SL con incremento en el tamaño de la carga de fondo y la disminución en valores SL donde los ríos fluyen sobre aluvión. Idealmente, la mineralogía, fábrica, unión, cementación, así como las relaciones geométricas con otras unidades de rocas, debería ser examinada con respecto a parámetros hidráulicos fluviales. Para un estudio que cubre un área grande no es

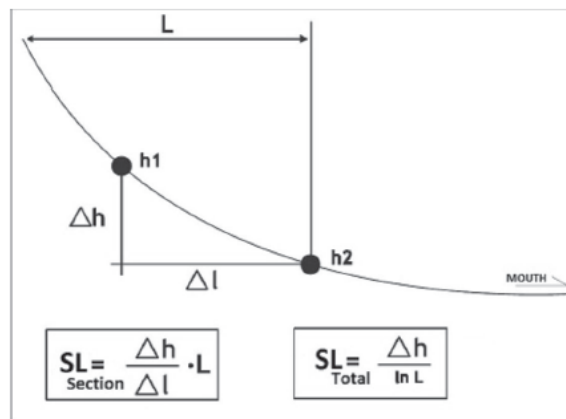
factible examinar factores litológicos detallados. En vez de eso, una revisión a amplia escala de las relaciones de litología con el SL fue realizado. (Mckeown, et al., 1807)

El índice SL fue aplicado a este trabajo como propuesto por Hack (1973) y usado por otros autores (Triani y Della Seta, 2007, Etchebehere et al., 2004, 2006; Missura, 2005, Monteiro, 2010) con el objetivo de identificar las anomalías morfométricas a lo largo del perfil longitudinal del río y su correlación con los factores de control como litología y tectónica del área. Las anomalías identificadas pueden llevar al entendimiento de las discontinuidades morfológicas principales dentro de la cuenca, permitiendo su correlación con controles litológicos, así como también estructurales.

El método consiste en la aplicación de la siguiente fórmula:

$$SL = \frac{\Delta h}{\Delta l} \times L \quad (4.3)$$

Siendo SL, el *índice Stream – Length*,  $\Delta h$  la diferencia entre el punto más alto y el más bajo de una sección dada del canal,  $\Delta l$  la proyección horizontal de la sección estudiada y L, la longitud del punto más lejano de la sección estudiada a la cabecera de la cuenca, en una línea recta. Para poder calcular el SL total, se debe dividir  $\Delta h$  total del drenaje por el logaritmo de L. Este modelo puede ser mejor visualizado en el siguiente esquema. . (Monteiro et al., 2010)



**Figura 4.7** Esquema mostrando el cálculo del índice SL (Etchebere et al., 2006 en Monteiro et al., 2010)

En relación con la anomalías del índice del drenaje, Seeber and Gornitz (1983) con respecto a anómalo, Ecuación (4.4) la SL de la sección dividida por el SL total.

$$AI = \frac{SL\ seccion}{SL\ total} \quad (4.4)$$

Donde AI es la anomalía del índice de drenaje. Cuando el resultado obtenido es menor a 2 (dos) no hay anomalías. Cuando el resultado es entre 2 (dos) y 10 (diez) una anomalía de 2<sup>do</sup> orden es definida. Cuando el resultado es igual o excede 10 (diez) una anomalía de 1<sup>er</sup> orden es definida (ver Tabla 4.1). Esta clasificación de la Tabla 4.1 implica que donde las anomalías de 1<sup>er</sup> orden son halladas, los canales del río son muy escarpados, anomalías de 2<sup>do</sup> orden ocurren en sectores donde los canales del río son simplemente “escarpados” y cuando el índice es menor que dos (2) los sectores del canal del río son “no escarpados” y el perfil longitudinal se dice que es gradado. (Monteiro et al., 2010).

**Tabla 4.1** Clasificación anomalía del índice de drenaje

Clasificación anomalía del índice de drenaje		
AI	Clases	Significado
< 2	No hay anomalía	No escarpado (gradado)
2 – 10	Anomalía de 2 <sup>do</sup> orden	Escarpado
>10	Anomalía de 1 <sup>er</sup> orden	Muy escarpado

#### 4.5 CALCULAR ATRIBUTOS PRIMARIOS Y SECUNDARIOS

Los atributos principales o primarios del terreno (Wilson y Gallant, 2000) son aquellos que se calculan directamente desde el MED. Los atributos secundarios o compuestos son aquellos que implican combinaciones de los atributos primarios y constituyen una base física o conjuntos de derivados empíricamente. Para calcular los atributos primarios se utilizó la herramienta ArcGIS 10.3. En las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 del capítulo anterior se resumieron los atributos primarios y secundarios que fueron analizados.

#### 4.6 MAPAS DE ÍNDICES DE EROSIÓN

Los modelos de erosión fluvial son el corazón de estos modelos y son todos similares en principio, pero varían en la ecuación constitutiva usada para representar

los procesos. Todas usan un modelo de capacidad de transporte explícito con balance de masa para la superficie y flujo del río. (Wilgoose, 2005)

Para esto primero debe calcularse el índice de erosión tomando en cuenta la precipitación. Posteriormente a partir de los índices de erosión se realizaron los mapas necesarios. Para ellos se utilizan las siguientes formulas.

#### 4.6.1 Índices de erosión

De acuerdo con Bermúdez et al., (2012) los índices de erosión pueden ser calculados de diversas formas como una función del poder erosivo del afluente o tributario, el cual se define como la tasa de gasto de energía potencial por corrientes de agua y se ha utilizado ampliamente en los estudios de erosión, transporte de sedimentos, y en geomorfología como una medida de la fuerza erosiva de los ríos y arroyos (Wilson y Gallant, 2000). El análisis se basa en una predicción de la tasa de incisión en el lecho de roca como una función de la potencia de la corriente (Finlayson et al., 2002; Tucker y Whipple, 2002.). (Arcia y Viana, 2013):

$$\dot{e} = k A_S^m S^n \quad (4.5)$$

Donde  $\dot{e}$  es la tasa de incisión local,  $A_S$  es el área de drenaje aguas arriba (usada como una aproximación para la descarga),  $S$  es la pendiente local,  $m$ ,  $n$  y  $k$  son constantes. El parámetro  $k$  está relacionado a la litología.

Con el propósito de incorporar las variaciones espaciales en la tasa de precipitación  $P$  y estudiar su influencia sobre el índice de erosión se realiza la siguiente modificación a la fórmula anterior, así quedaría:

$$\dot{e}_p = \sum (A_p P)^m S^n \quad (4.6)$$

Donde  $A_p$  es el área de cada píxel y el símbolo de sumatoria implica que se ha tomado la suma de las precipitaciones sobre cada píxel dentro de la cuenca. Bermúdez et al., (2012) denomina  $\dot{e}_p$  al índice de erosión con precipitación.

De manera que se puedan ajustar los modelos de superficies de erosión generados, de una forma más próxima a la realidad, es necesario tomar en cuenta dichas condiciones meteorológicas, para ello se ha de incluir los registros de precipitaciones locales.

En cuanto a los registros TRMM, estos son descargados desde la página <http://www.geog.ucsb.edu/~bodo/TRMM/>, y luego se procede a proyectar dichas imágenes de la misma forma que para el MDE.

Una vez obtenidos los Rasters de precipitaciones del TRMM, al realizar los cálculos de índice de erosión, se le da el peso que proporcionan los registros de precipitaciones.

Diferentes valores de  $m$  y  $n$  pueden ser usados en las ecuaciones anteriores dependiendo de la forma como son controladas las tasas de incisión de los ríos. Así se derivan las siguientes expresiones (Arcia y Viana, 2013):

#### 4.6.1.1 Poder de flujo total (TSP)

Es el caso en el cual la tasa de incisión está controlada por el poder de flujo total o "*Total Stream Power (TSP)*",  $m=1, n=1$ . (Arcia y Viana, 2013)

$$TSP = A_S S \quad (4.7)$$

#### 4.6.1.2 Poder de flujo unitario (USP)

La tasa de incisión está controlada por el ancho del canal, también se conoce como "*Stream Power Per UnitChannelWidth (USP)*"  $m = \frac{1}{2}, n = 1$ . (Arcia y Viana, 2013)

$$USP = \sqrt{A_S} S \quad (4.8)$$

#### 4.6.1.3 Poder de flujo de cizalla (SSP)

Si la incisión es controlada por el esfuerzo de cizalla fluvial o "*Fluvial Shear Stress (SSP)*".  $m = \frac{1}{3}, n = \frac{2}{3}$ . (Arcia y Viana, 2013). Así se obtiene:

$$SSP = \sqrt[3]{A_S} S^2 \quad (4.9)$$

Las ecuaciones anteriores miden la potencia erosiva de la corriente de agua basado en el supuesto que la descarga (caudal) ( $q$ ) es proporcional al área de la cuenca específica  $A_s$ . También predicen la erosión total en el área del perfil de convexidad y la concavidad tangencial. (Las zonas de convergencia y aceleración de

flujo) y la depositación neta en áreas de perfil cóncavo (zonas de disminución de la velocidad de flujo). (Arcia y Viana, 2013)

#### 4.6.2 Herramientas para el cálculo en ARCGIS10.3.

Como herramienta para el cálculo de todas las expresiones matemáticas anteriormente utilizadas, el software ArcGIS 10.3, cuenta con una Calculadora de Raster o "*Raster-Calculator*" (ver Figura 4.8), la cual facilita la manipulación matemática de los diversos Rasters a utilizar para el análisis espacial del terreno

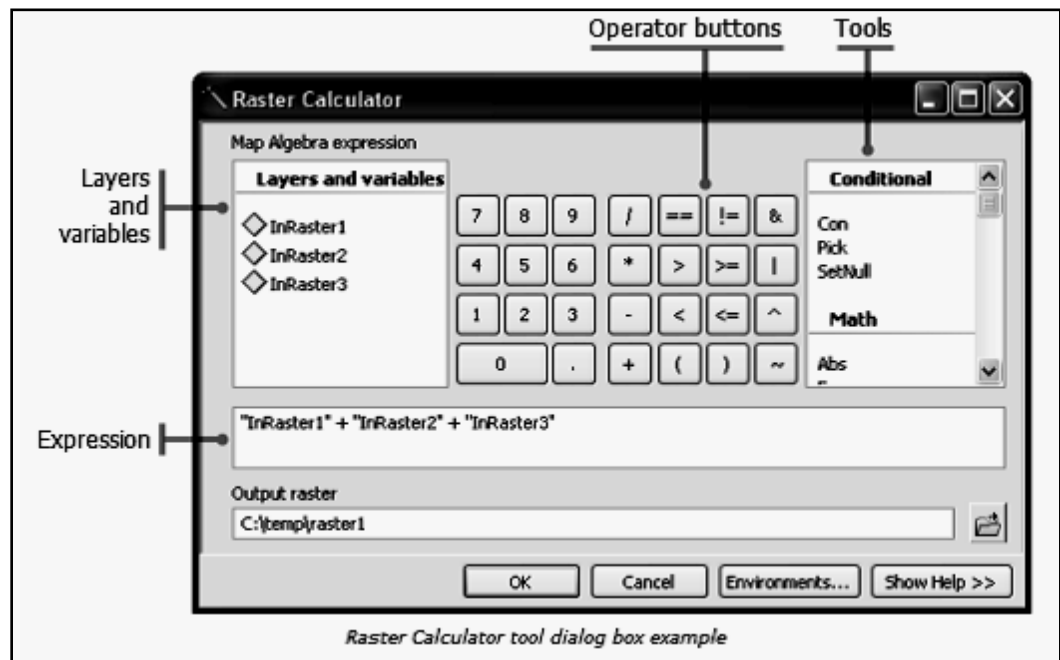


Figura 4.8. Calculadora de Raster que cuenta el software ArcGIS 10.3.

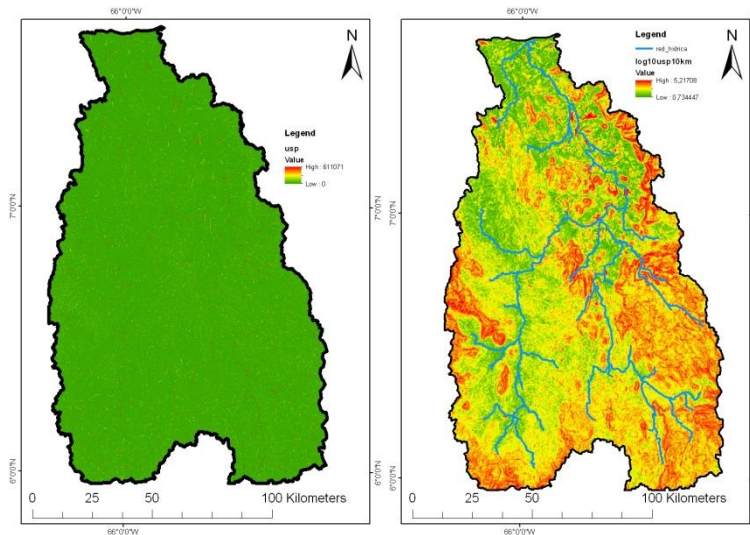
#### 4.6.3 Herramientas para una Visualización Óptima

Debido a que la expresión visual producto de los cálculos de los índices de erosión se concentran en los sistemas de drenajes, se ignora casi por completo los efectos de la erosión en las zonas circundantes a dichos afluentes, es por ello que se recurre al comando Estadística Focalizada o "*Focal Statistics*" en ArcGIS 10.3. Dicho comando permite extrapolar los valores de los índices de erosión a las zonas circundantes de manera que facilita la interpretación y evaluación de los efectos de la erosión en las cuencas estudiadas, lo cual permite la generación de modelos



cuantitativos de predicción del riesgo de erosión (Martínez-Casasnovas 1998 En Figueira y Romero 2014)

El comando "focal statistics" permite realizar operaciones algebraicas y obtener valores estadísticos para el entorno de un píxel. La geometría del entorno definida para este trabajo es del tipo circular, con un radio de 2, 4 o 10km, esto quiere decir, que a partir de un píxel que corresponda con la ubicación de algún drenaje, el cual posee un valor específico de índice de erosión, al aplicar este comando, se extrapola la información que posee dicho píxel, con una geometría circular a un radio definido por el usuario. En la Figura 4.9, se puede visualizar la diferencia entre un modelo de elevación digital al cual se le calculó el índice de erosión USP, y luego aplicándole el comando "focal statistics".



**Figura 4.9.** Comparación visual entre el índice de erosión USP para la cuenca del río Cuchivero: a) Sin aplicar la herramienta "focal statistics"; b) Aplicando la herramienta "focal statistics" con una geometría del entorno circular, con radio de 10 km.

#### 4.6.4 Erosión y Dimensión fractal

El modelado terrestre y su expresión topográfica son el resultado de la acción de dos procesos frecuentemente contrapuestos: tectónicos y erosivo-sedimentarios. En los últimos años han proliferado los estudios que abordan la aplicación de la geometría fractal a problemas geomorfológicos, y especialmente al del modelado por la erosión fluvial. También han sido analizados desde la perspectiva fractal entre

otros temas, la erosión de los acantilados litorales, los escarpes de fallas, las repercusiones de la tectónica y el clima sobre la topografía, la geometría de cuencas hidrográficas, etc.

Hoy en día se menciona que la morfología del paisaje y los procesos de erosión podrían ser invariantes a los cambios de escala y, por tanto, fractales. Sin embargo, cambios en los valores de la dimensión fractal pudieran estar asociados a cambios en los agentes controladores del paisaje dentro de las cuencas hidrográficas. Probablemente, mientras algunos procesos puedan actuar sobre un amplio rango de escalas, como por ejemplo las redes de drenaje, otros sólo deben operar sobre intervalos espaciales muy concretos, como es el caso de los glaciares.

La dimensión fractal es un concepto para la medición de la rugosidad en la curva fractal que muestra el grado de complejidad del sistema en estudio. De hecho, la dimensión fractal es una cantidad estadística que muestra cómo un fractal ocupa el espacio cuando la escala disminuye. Esta característica de los fractales es robusta y es independiente de la relación de aumento o crecimiento del fractal.

Para el estudio de la distribución altitudinal de las cuencas, en primer lugar, se convierte el mapa topográfico de toda la cuenca a un archivo numérico que será trasladado a un sistema de información geográfica (SIG). Posteriormente se calcula la red de drenajes, la acumulación y dirección de flujo, los datos son ordenados para estimar el orden de Strahler. Este mide la forma como los tributarios se van sumando para formar un curso de agua de un nivel mayor. Cuando dos corrientes de orden menor se reúnen, forman un arroyo con un orden más alto que el original. Por lo tanto, dos corrientes de primer orden se combinan para formar una segunda corriente de orden, dos corrientes de segundo orden se combinan para formar una corriente regresiva de tercer orden, y así sucesivamente. De esta manera es posible estimar la relación de bifurcación  $R_B$  como (Khanbabaei et al., 2013):

$$R_B = \frac{N_i}{N_{i+1}} \quad (4.10)$$

Donde  $N_i$  es el número de arroyos de orden  $i$ . La relación de orden de longitud  $R_i$ , se calcula como:

$$R_l = \frac{r_i}{r_{i+1}} \quad (4.11)$$

Donde  $r_i$  es la longitud de los arroyos de orden  $i$ ;  $R_B$  y  $R_l$  generalmente son casi constantes para un rango de órdenes de tributarios en el drenaje de una cuenca. Combinando estas dos últimas ecuaciones se define la dimensión fractal de la red de drenajes como:

$$D = \frac{\ln\left(\frac{N_i}{N_{i+1}}\right)}{\ln\left(\frac{r_i}{r_{i+1}}\right)} = \frac{\ln(R_B)}{\ln(R_l)} \quad (4.12)$$

La geometría fractal puede ser considerado como un método adecuado en el estudio de la geomorfología de los ríos (Turcotte, 2007; Khanbabaei et al., 2013). La dimensión fractal de las redes fluviales en las cuencas sugiere el grado de similitud geomorfológica e hidrológica en ellos, parámetros tales como la relación longitudinal de los cauces, la relación filial, su curvatura y la abundancia, la forma y el ancho de las direcciones, y las particularidades topográficas de la región, las cuales se consideran importantes en la determinación de la dimensión fractal. Matemáticamente hablando, las cuencas cuyas dimensiones fractales son las mismas serían métricas equivalentes, por lo tanto, no habría mucha similitud entre las propiedades geomorfológicas y las características hidrológicas de las cuencas. La interrupción de esos patrones de similitud o autosimilaridad, es una de las características más importantes a estudiar ya que esto significa que a lo largo del tiempo geológico diferentes fenómenos han ejercido controles temporales sobre el patrón de drenajes. (Turcotte, 2007; Khanbabaei et al., 2013)

#### **4.7 INDICE DE FRACTURAMIENTO**

También se calculó un índice de fracturamiento o fallamiento (IF) que involucra las fallas que están en la cuenca a estudiar y se le agrego el peso de los epicentros sísmicos que existan, este índice permite ser correlacionado con los demás parámetros obtenidos para estimar el papel que juega la tectónica en el modelado del relieve de las cuencas de la zona de estudio.

#### **4.8 INTERACCIÓN ENTRE EL RELIEVE ACTUAL Y LA GEOMORFOLOGÍA DE LAS CUENCAS ANALIZADAS**

El Modelo de Elevación Digital es de valiosa importancia para la definición del relieve en la zona de estudio, así mismo el perfil longitudinal, las curvas hipsométricas, la integral hipsométrica y otros parámetros (Tablas 3.1 y 3.2) de cada subcuenca son muy importantes ya que permite evaluar los procesos de rejuvenecimiento de las cuencas hidrográficas antes mencionadas, los “Stream – Gradient Index” nos permite evaluar la influencia a gran escala de la litología, y los índices de erosión permitirán establecer la relación del clima en la evolución del relieve, finalmente el estudio de la dimensión fractal entre cuencas permite discriminar si el posible efecto de los procesos tectónicos o climáticos cambian entre ellas. Para la clasificación del relieve se realizaron cálculos de los atributos primarios y secundarios del terreno. Ya habiendo realizado todos estos cálculos que representan las características de cada una de las Subcuencas de los tributarios de la zona central de río Orinoco, se procedió al análisis de correlación múltiple entre variables para determinar ¿cuáles de los parámetros son los más importantes para formar el relieve actual de la zona central de la cuenca del río Orinoco?

## CAPITULO V

### RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

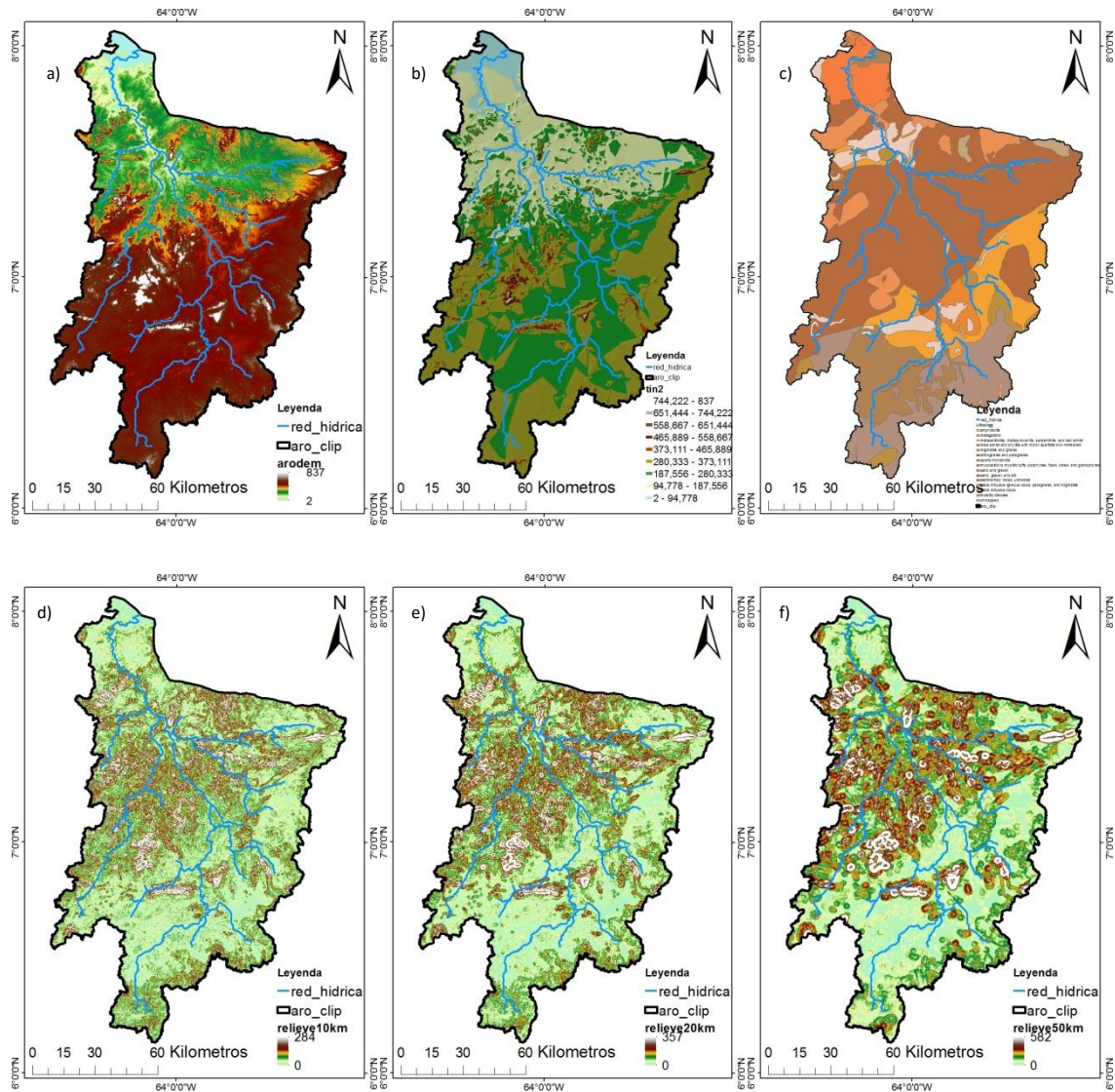
En este capítulo se resume los resultados obtenidos luego de haber analizado las subcuencas pertenecientes la zona central de la cuenca del río Orinoco.

#### 5.1 DEFINICION DE RELIEVE MEDIANTE MODELO DE ELEVACION DIGITAL (MED)

**Tabla 5.1** valores del Relieve del río Aro, Caura, Cuchivero, Pao, Manapire y zuata

Cuenca	Relieve (10 km)				Relieve (20km)				Relieve (50km)			
	Min	max	media	SD	min	max	media	SD	min	max	media	SD
Aro	0	284	22,08	21,41	0	357	37,37	35,74	0	582	72,55	63,46
	0	516	33,47	39,75	0	705	56,82	69,15	0	1014	111,87	131,57
Cuchivero	0	576	49,589	45,29	0	599	87,19	77,79	0	1077	176,37	142,56
	0	64	10,19	5,77	0	74	16,34	8,47	0	86	29,58	13,22
Manapire	0	93	8,50	6,03	0	134	12,97	9,52	0	193	22,12	16,33
	0	90	8,42	4,43	0	124	12,72	6,51	0	172	21,81	11,28

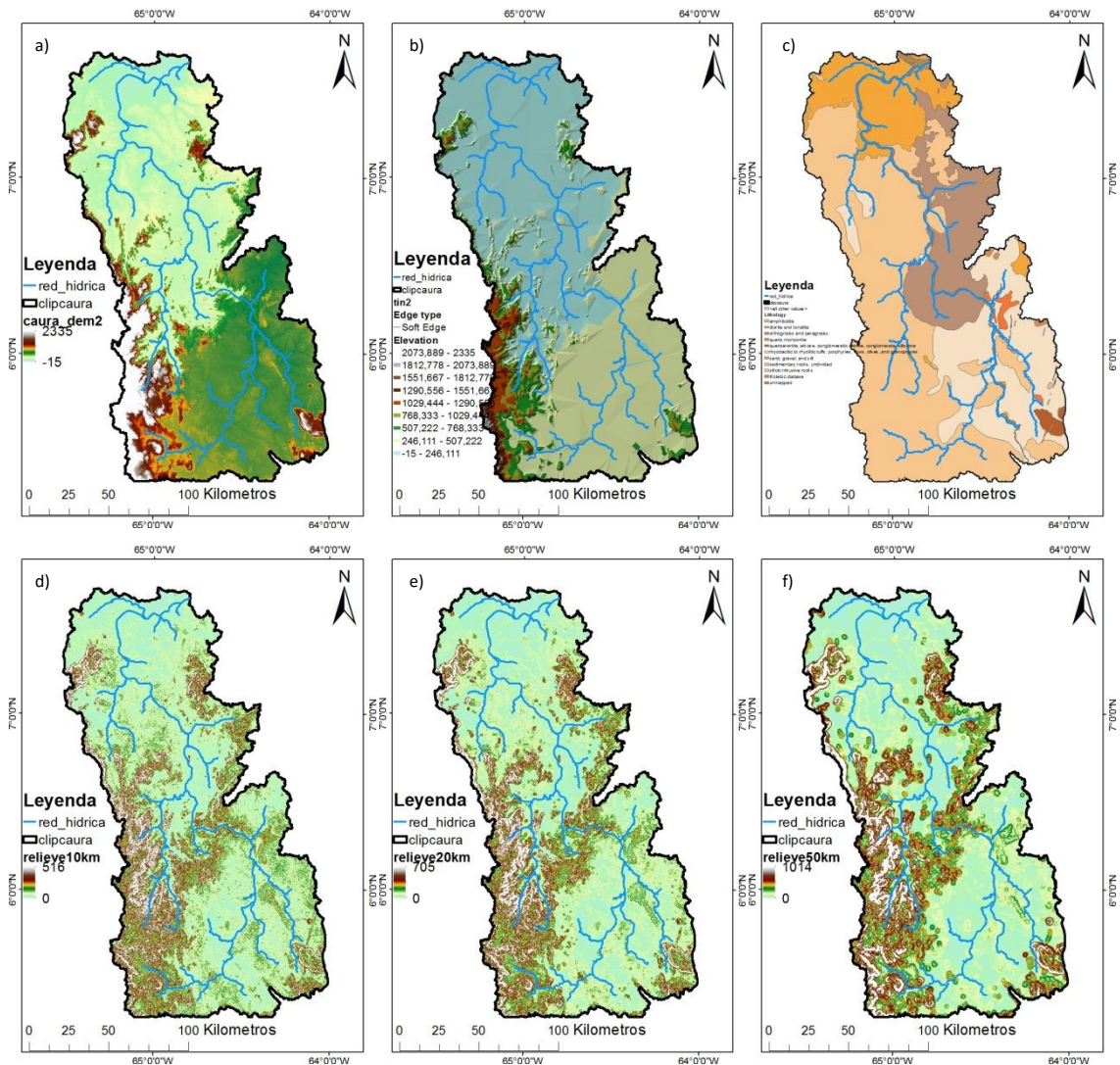
El río aro se encuentra en el Estado Bolívar, es uno de los afluentes del río Orinoco por su margen derecho (sur), en inmediaciones de la villa de Borbón a mas de 80 km aguas arriba de Ciudad Bolívar. Se formo por la confluencia de los Ríos Sucre, Azul y Alachuela en el escudo del Orinoco Guayana, fluye en dirección sur- Noroeste y sur-norte. Su cuenca fue definida mediante el programa ArcGIS. Se puede observar como las zonas más elevadas están hacia el sur de la cuenca, lo cual concuerda con el frente montañoso del escudo guayanés. Presentando relieve de cumbres positivas muy elevadas que alcanzan alturas de hasta 800 m entre los interfluvios del río que se encuentran entre las zonas suaves y rebajadas por el curso del río en las zonas de valles. Este río se encuentra en las zonas de la provincia de Imataca que tiene Gneises félsicos y máficos intercalados con capas de cuarcitas ferruginosas y granulitas con cuerpos delgados interestratificados de rocas graníticas. (Ver Figura 5.1)



**Figura 5.1** Modelo de elevación digital de la cuenca del río Aro. a) DEM b) TIN c) Mapa Litológico d) Relieve 10km e) Relieve 20km f) Relieve 50km

En la Figura 5.2 se tiene el río Caura que por su parte es el tercer río más grande de Venezuela y el segundo tributario principal del río Orinoco. Se encuentra ubicado en el Estado Bolívar, entre los municipios Cedeño y Sucre. Limitado con los ríos Orinoco, Aro y Cuchivero. Posee una cuenca que a pesar de alcanzar valores de elevaciones mayores que las demás cuencas estos se concentran mayormente en la periferia de la cuenca, con pocas cumbres muy elevadas entre los interfluvios y en su mayor parte estas cumbres no sobrepasan la elevación media de la cuenca. Esta cuenca se encuentra entre las inmediaciones de la provincia Imatoca y Cuchivero presentando tantos Gneises félsicos y

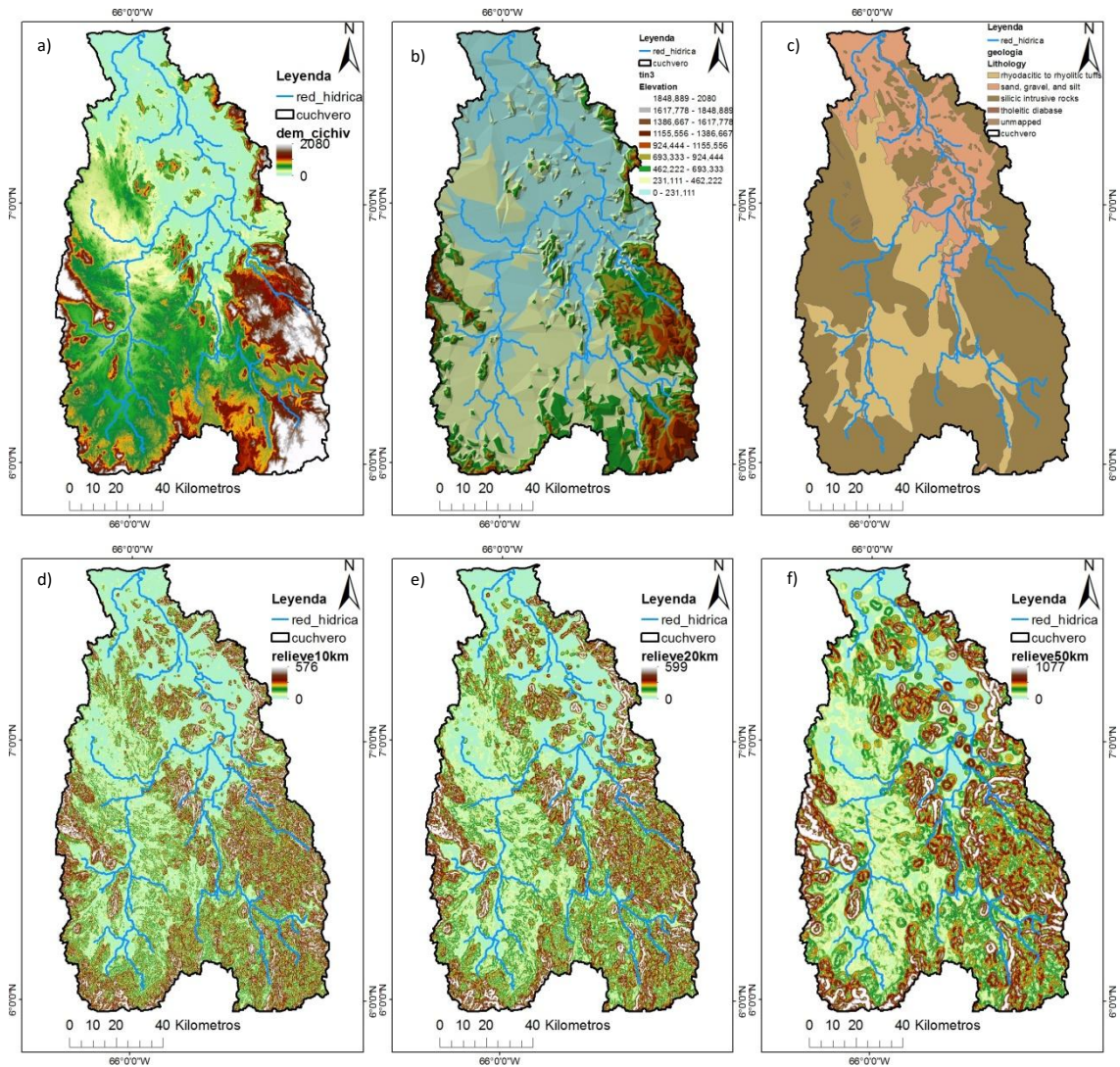
maficos intercalados con capas de cuarcitas ferruginosas así como también rocas plutónicas de emplazamiento epizonal y epimezonal.



**Figura 5.2** modelo de elevación digital de la cuenca del río Caura. a) DEM b) TIN c) Mapa Litológico d) Relieve 10km e) Relieve 20km f) Relieve 50km

Por su parte el río Cuchivero se encuentra en el Estado Bolívar, Municipio Cedeño, cercano a Caicara del Orinoco y Maripa. Esta cuenca al igual que la del río Caura alcanza valores de elevación muy altos, pero estos a pesar de concentrarse en su mayoría en la periferia se puede observar muchas cumbres entre los interfluvios de gran altura que llegan a alcanzar alturas de hasta 2000 m aproximadamente. Esta cuenca se encuentra en las inmediaciones de la Provincia de Cuchivero las cuales son generalmente rocas plutónicas de emplazamiento epizonal y epimezonal y rocas meta volcánicas, estas últimas en menor proporción. Todas estas cuencas al sur del río Orinoco se encuentran en basamento ígneo

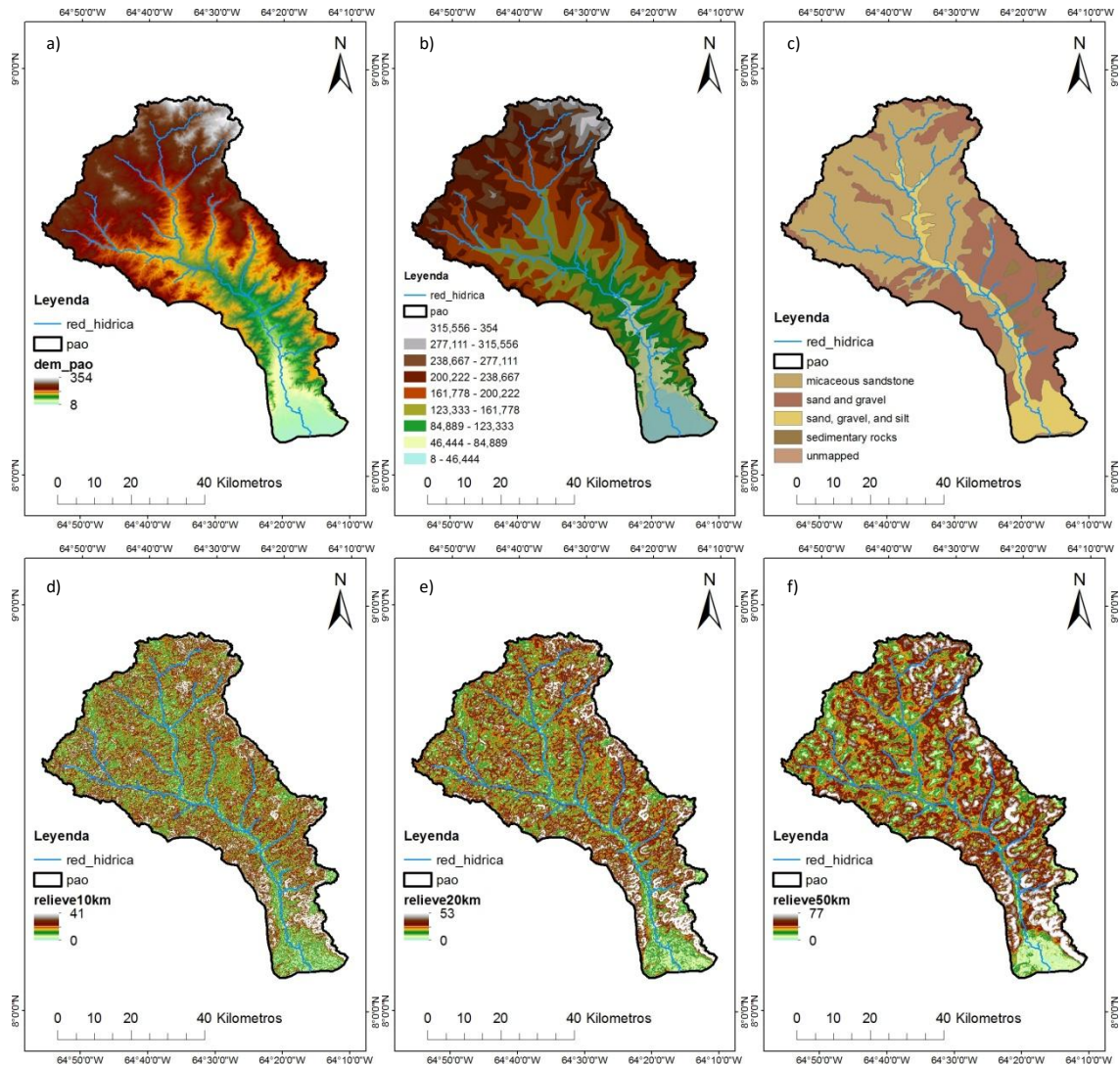
metamórfico del escudo guayanés, pero también cercano a su desembocadura tiene en el lecho de los ríos se encuentra la formación mesa. La cual es básicamente la zona de llanura aluvional del río Orinoco. (Ver Figura 5.3)



**Figura 5.3** Modelo de elevación digital de la cuenca del río Cuchivero. a) DEM b) TIN c) Mapa Litológico d) Relieve 10km e) Relieve 20km f) Relieve 50km

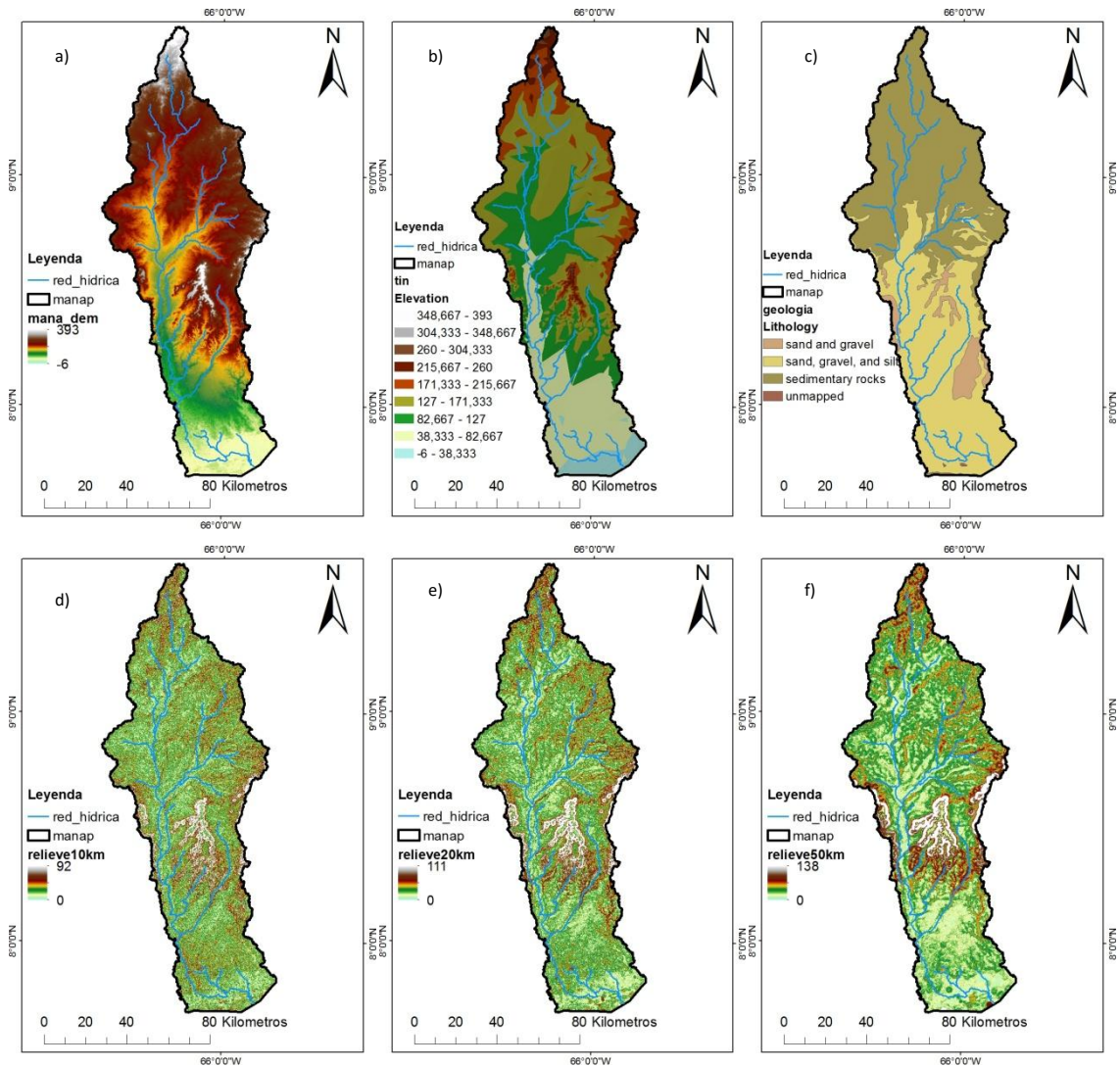
El río Pao se encuentra en el Estado Anzoátegui, al noreste de la zona central de la cuenca del río Orinoco. Cerca de la ciudad de Pariaguán. Tiene una elevación promedio de 168,893 m. En la Figura 5.4 se puede observar que presenta un relieve suave con valles encauzados con alturas que no sobrepasan los 400m que decrece de norte a sur, representados por extensas mesas. Este se encuentra en con un lecho del río de la formación mesa que no son más que intercalaciones de abanicos aluviales, sedimentos fluviales, deltaico y pantanosos.





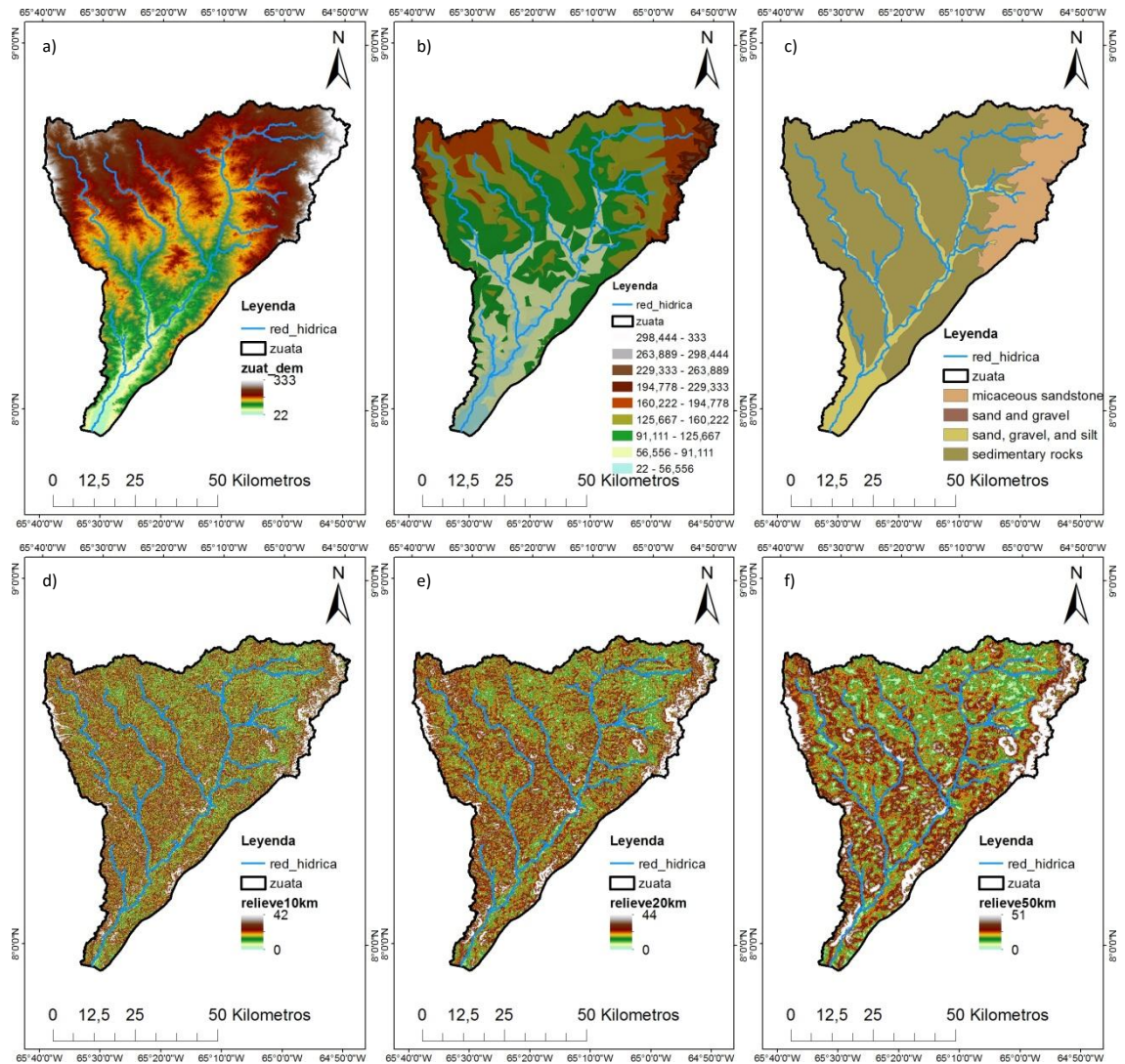
**Figura 5.4** Modelo de elevación digital de la cuenca del río Pao. a) DEM b) TIN c) Mapa Litológico d) Relieve 10km e) Relieve 20km f) Relieve 50km

El río Manapire que se encuentra en los llanos de Guárico, cerca de Tarrayero, Isla Tarumá e Isla Tarumita. Nace en la jurisdicción del caserío Las Piedras en el municipio Chaguaramos, en las montañas ubicadas al sur de Altigracia del Orituco, atraviesa todo el municipio Leonardo Infante hasta desembocar en el río Orinoco. En la Figura 5.5 se observa que presenta un desnivel progresivo decreciente hacia el sur, con pocas zonas de cumbres que igual no sobrepasan los 400 m, que no son más que las extensas mesas características de la formación Mesa, la cual son sedimentos de aluviones finos en esta zona de Guárico.



**Figura 5.5** Modelo de elevación digital de la cuenca del río Manapire. a) DEM b) TIN c) Mapa Litológico d) Relieve 10km e) Relieve 20km f) Relieve 50km

El río Zuata ubicado en los llanos centrales de Venezuela, es frontera entre Guárico y Anzoátegui, se origina en el Estado Guárico, muy cerca del Hato Loma del Viento y llega al Estado Anzoátegui a mitad del curso frente a la ciudad de Zuata. Es la cuenca con los menores valores de elevación y aunque en su zona más alta alcanza los 333 m, esto es sólo hacia el norte de la cuenca, representado por las zonas más elevadas de extensas mesas de la Formación Mesa. Con características de sedimentos fluvio – deltaicos recubiertos generalmente por una costra de grava ferruginosa endurecida como un paleosuelo probablemente formado durante el Pleistoceno superior. (Ver Figura 5.6)



**Figura 5.6** Modelo de elevación digital de la cuenca del río Zuata. a) DEM b) TIN c) Mapa Litológico d) Relieve 10km e) Relieve 20km f) Relieve 50km

Estos afluentes del río Orinoco en la zona central de la cuenca del mismo presentan una red de drenaje de tipo dendrítico característico de zonas con rocas sedimentarias prácticamente horizontales, rocas ígneas y metamórficas macizas; que presentan una resistencia a la erosión uniforme y no ejercen control sobre la dirección del crecimiento del valle.

## 5.2 EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA TECTÓNICA EN EL RELIEVE A PARTIR DE PERFILES LONGITUDINALES DE LOS RÍOS

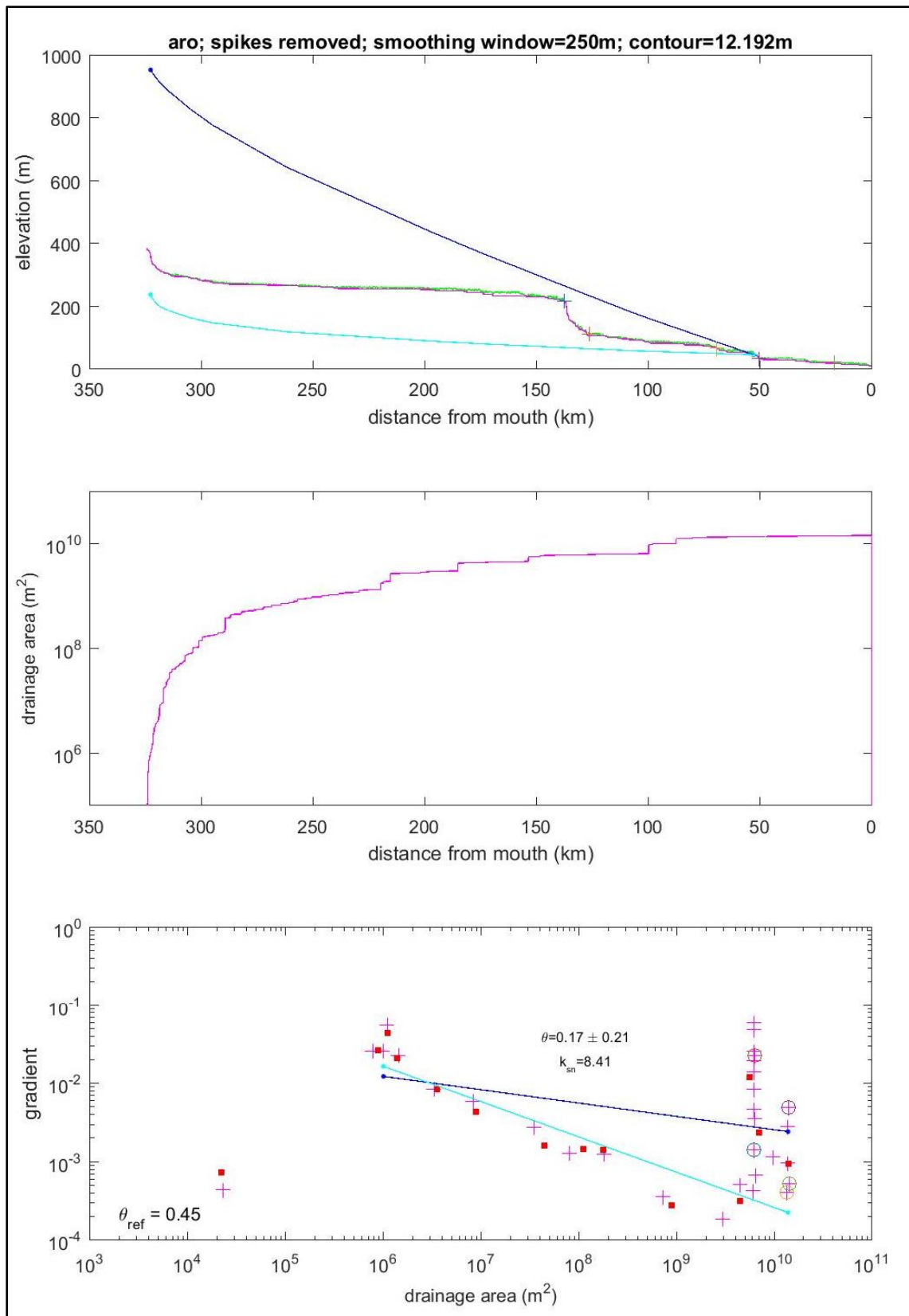
Para la evaluación de los perfiles se tomaron los resultados obtenidos de perfiles del programa Matlab y la herramienta Profiler Toolbar de ArcGIS (Whipple, 2007, los perfiles

obtenidos son: perfil longitudinal, área de drenaje/distancia, gradiente/distancia, elevación/chi, gradiente/distancia y ksn promedio/distancia. Se identificaron diversos knickpoints, que de igual manera fueron graficados para discriminar los puntos de inflexión, los cuales indican lugares de posible levantamiento por efectos tectónico. Se puede observar que la primera Figura obtenida de los perfiles (Figuras 5.7, 5.9, 5.11, 5.13, 5.15 y 5.17) muestran: a) perfil longitudinal, donde: Elevaciones irregulares en verde, suavizadas en Rosado y la línea azul son los perfiles predichos por la concavidad del canal de regresión. Las líneas cian son por la concavidad de referencia (0.45), los signos positivo (+) indican la ubicación de los knickpoints seleccionados. b) perfil área de drenaje/distancia. c) Perfil gradiente/área de drenaje, donde: los mismos colores azul y cian representan la concavidad de regresión y de referencia. Los cuadros rojos son los valores promedio de gradiente y área de drenaje y los círculos abiertos son la ubicación de los knickpoints como en el perfil longitudinal. Y por su parte la segunda Figura obtenida del programa Profiler Toolbar (Figura 5.8, 5.10, 5.12, 5.14, 5.16 y 5.18) muestran: a) Perfil elevación /chi( $\chi$ ), donde: la integral del área de drenaje a ese punto en el perfil. Ajustes de regresión con concavidad de referencia en azul oscuro. b) gradiente/distancia. c) ksn/distancia.

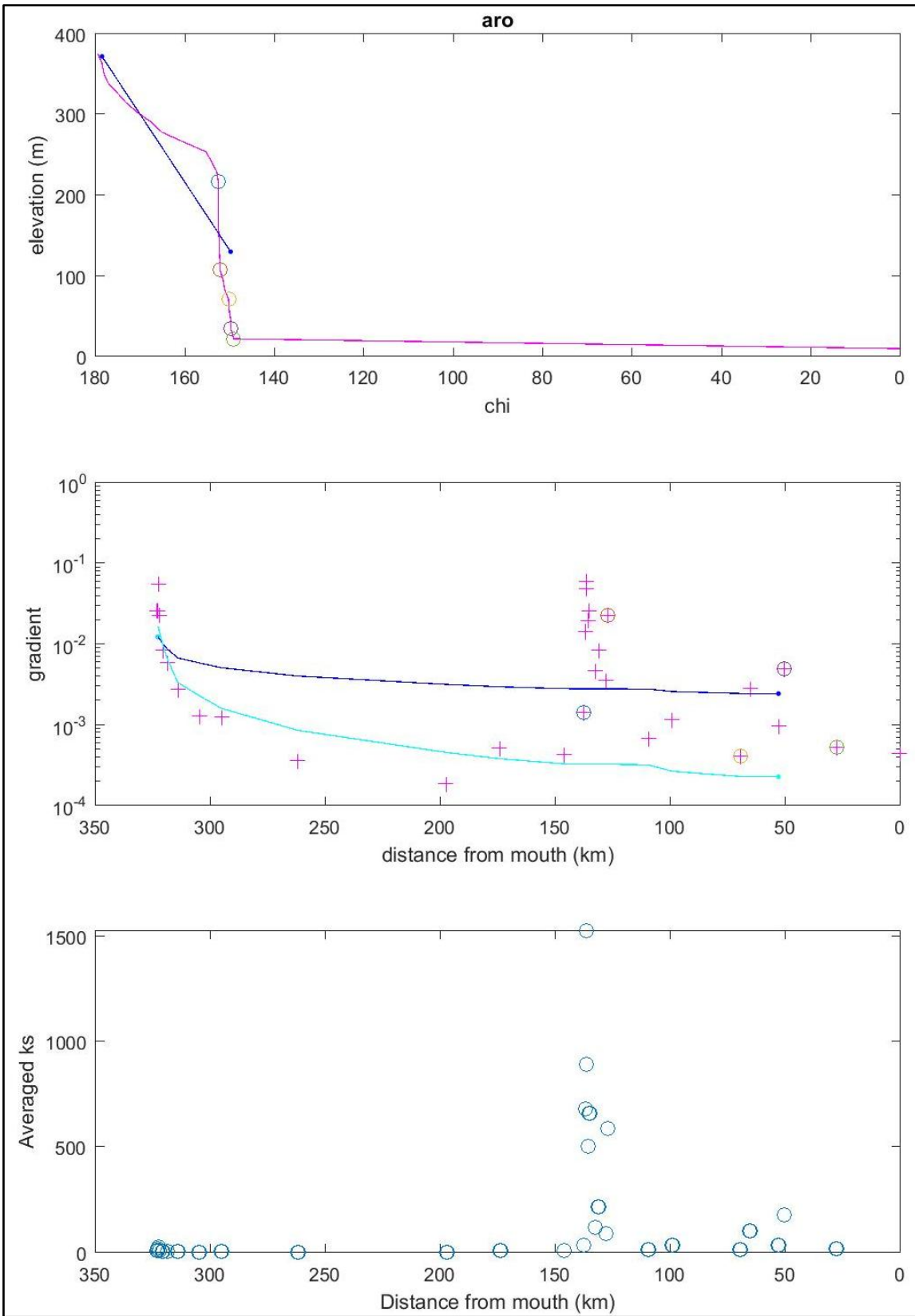
También se calculó índice de verticalidad (ks) y el índice de verticalidad normalizado (ksn) siendo este último graficado para un mejor análisis lo que permite identificar las zonas de mayor incisión o puntos de inflexión (knickpoints) importantes. Para graficar los valores de ksn se utilizaron el programa Topo Toolbox en conjunto con el Matlab.

Para el río Aro se puede observar en el perfil longitudinal (Figura 5.7a) una morfología cóncava que empieza su desarrollo a partir del área de drenaje  $10^4\text{m}^2$ . Con marcados knickpoints que representan un desequilibrio en el perfil longitudinal del río. Con una tasa de levantamiento que va incrementando y una litología baja (rocas que son más resistentes en bajo alcance). Para el perfil que relaciona el área de drenaje y la distancia tenemos que el mismo presenta un aumento progresivo a medida que se acerca a la desembocadura del río, sin cambios bruscos o pronunciados (Figura 5.7b). Para el perfil gradiente/área de drenaje se puede observar como los valores se representan o inician en área de drenaje superiores a  $10^5\text{m}^2$  y los valores de  $\theta$  van desde  $0,17 \pm 0,21$  lo que representa bajas tasas de incisión a lo largo de todo el río. El valor de  $R^2 = 0,1$  lo cual

supone que la relación gradiente/área de drenaje no es lineal, representando esto que este río se encuentra en desequilibrio. (Figura 5.7c). Mientras que la linealidad en el perfil elevación/chi ( $\chi$ ) se ve interrumpida y presenta un aumento rápido de la pendiente de la línea, lo que significa que hay potencialmente un incremento en la tasa de levantamiento tectónico (Figura 5.8a). Por su parte la distribución progresiva de la relación gradiente distancia se ve interrumpida presentando mayor abundancia de los valores representados en los sitios que coinciden con los knickpoints identificados en el perfil longitudinal. (Figura 5.8b). Igualmente si se observa la relación de los valores ksn con la distancia nos permite inferir donde están aquellas zonas con mayor incisión, en este caso se puede observar como los valores de ksn mayores se encuentran justamente en la zona de knickpoints identificada.



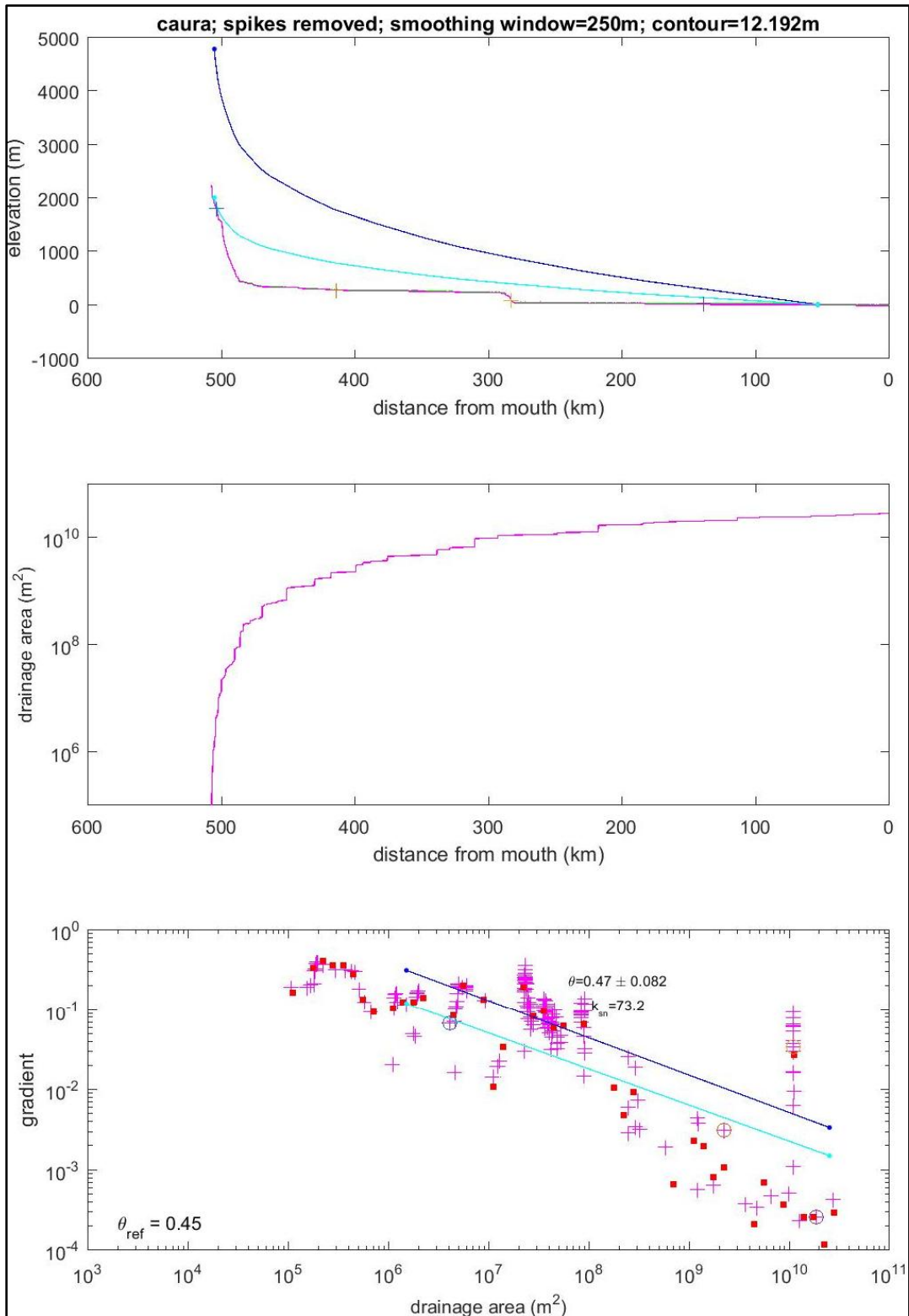
**Figura 5.7.** a) Perfil longitudinal. b) perfil área de drenaje/distancia. c) perfil gradiente/área de drenaje,



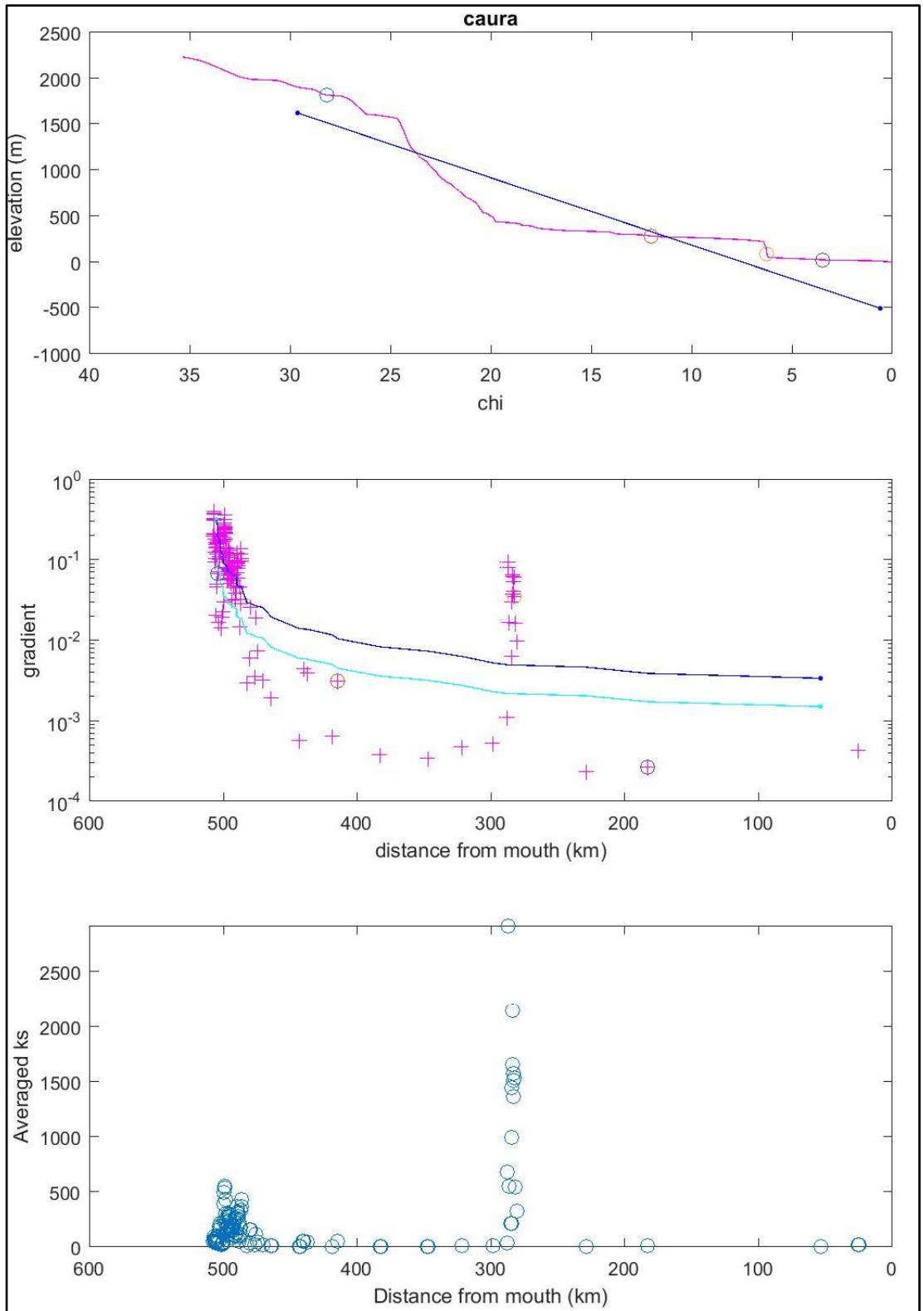
**Figura 5.8.** a) Perfil elevación /chi. b) gradiente/distancia. c) ksn/distancia.

Para el río Caura los perfiles analizados son similares a los analizados en el río aro. De igual manera el río Caura presenta una morfología cóncava, la cual comienza su desarrollo a partir del área de drenaje  $10^4\text{m}^2$ . Los knickpoints identificados suponen una zona de desequilibrio en el perfil, con tasas de levantamiento que incrementan y una litología baja. (Figura 5.9a). Por su parte el perfil área de drenaje versus distancia a la boca del río tiene un aumento progresivo mientras se acerca a la desembocadura del río mismo (Figura5.9b). El perfil gradiente/área de drenaje muestra que la relación entre ellos empieza a graficarse a partir de un área de drenaje  $10^5\text{m}^2$ . Con valores de  $\theta$  que van desde  $0.47 \pm 0,082$  lo que refleja que tiene mejores tasas de incisión que el río aro. El valor de ksn es de 73,2 el cual es el más altos de todas las cuencas aquí analizadas. El  $R^2$  alcanza un valor de 0,45 lo cual significa que el modelo representado en el grafico no es lineal por lo que se dice que está en desequilibrio (Figura5.9c). La pendiente de la curva del Grafico Chi ( $\chi$ ) muestra como la pendiente es suavizada con un aumento progresivo, pero con una linealidad bastante interrumpida en vario puntos lo cual quiere decir que hay un incremento en las tasas de levantamiento tectónico (Figura5.10a). Al igual que en el río Aro es posible observar que en el grafico que relaciona el gradiente con la distancia la distribución de los puntos se ve interrumpida en las mismas zonas donde se identificaron los knickpoints (Figura5.10b). Para el perfil de ksn/distancia puede observarse que los valores de ksn aumentan en las zonas de knickpoints más importantes, lo cual significa altas tasas de incisión en estas zonas que pueden ser resultado de la tectónica, la litología y/o factores climáticos (Figura5.10c).





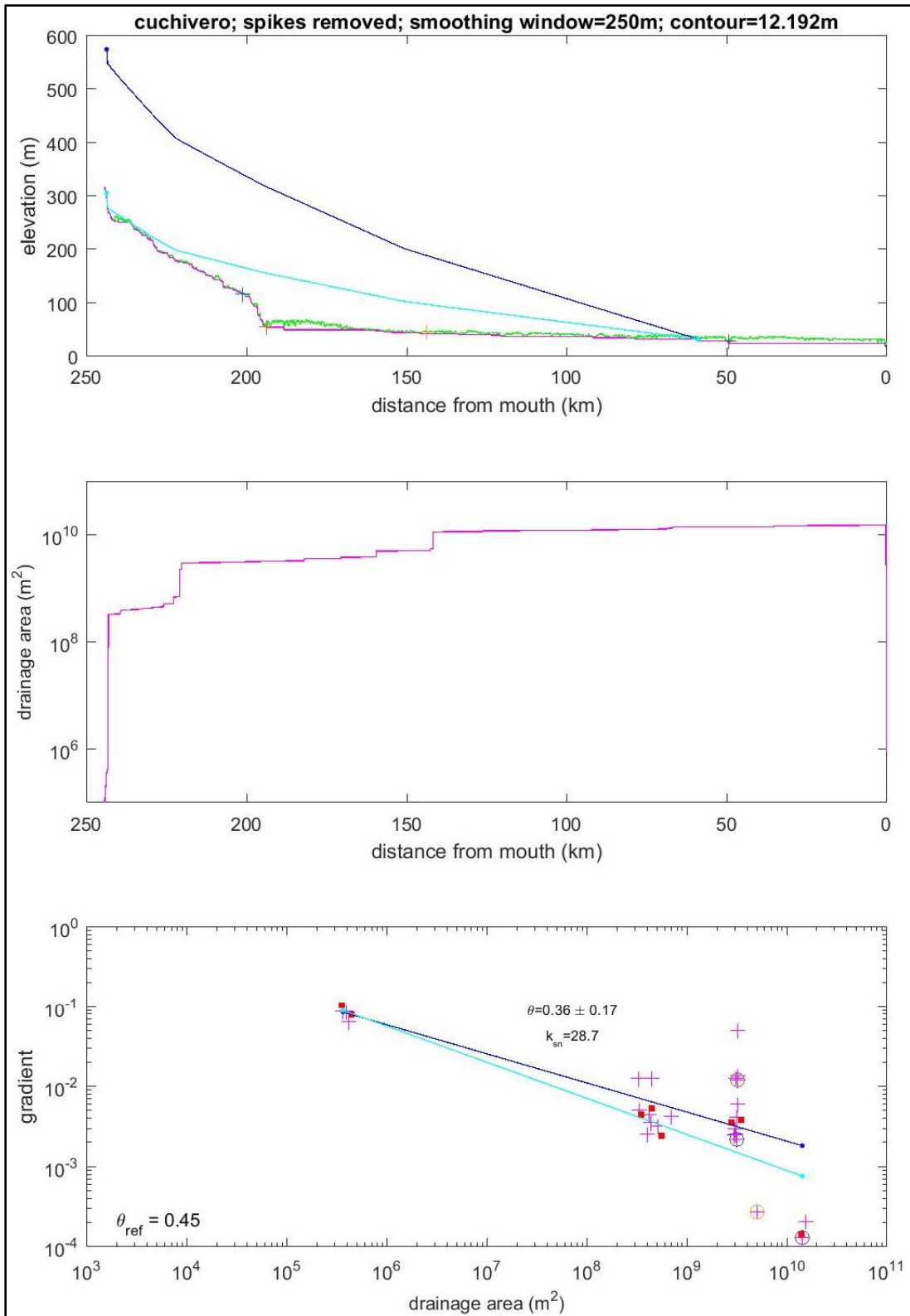
**Figura 5.9** a) Perfil longitudinal. b) perfil área de drenaje/distancia. c) Perfil gradiente/área de drenaje,



**Figura 5.10** a) Perfil elevación /chi. b) gradiente/distancia. c) ksn/distancia.

Para el río Cuchivero tenemos que su perfil presenta una morfología cóncava que empieza su desarrollo en un área de drenaje mayor a  $10^3\text{m}^2$ . Con varios knickpoints fácilmente observables que representan un perfil del desequilibrio para este río (ver Figura 5.11a). Para el perfil de la Figura 5.11b puede observarse que la relación entre el gradiente y el área de drenaje va aumentando progresivamente hacia la desembocadura pero presenta algunos saltos más notables que están cercanos a las zonas de los knickpoints. Por su parte la relación entre el gradiente y el área de drenaje comienza su desarrollo a partir de un área de drenaje mayor a  $10^5\text{m}^2$ . Con valores de  $\theta$  que van desde  $0,36 \pm 0,17$  lo cual indicaría una tasa de incisión regular con un valor de  $k_{sn}$  de 28,7. Mientras el  $R^2$  presenta valores de 0,48 indicando que el modelo no es lineal por lo tanto el río está en desequilibrio (Figura 5.11c). Para el perfil Chi ( $\chi$ ) tenemos que la pendiente aumenta progresivamente y esta suavemente inclinada pero su linealidad se ve interrumpida en varios puntos. Lo cual sugiere un incremento en la tasas de levantamiento tectónico (Figura 5.12a). Por su parte el perfil que relaciona el gradiente con la distancia tiene una distribución que disminuye progresivamente hacia la desembocadura, pero se ve interrumpida con aumentos importantes en la zona de los knickpoints (Figura 5.12b). Para el perfil de  $k_{sn}$ /gradiente tenemos que los mayores valores de  $k_{sn}$  se presentan en la zona de knickpoints (Figura 5.12c).

Como es posible observar, los perfiles que se encuentran al sur del río Orinoco presentan similitudes en forma general sus perfiles están en desequilibrio presentando marcados knickpoints observables claramente en el perfil longitudinal y pueden ser identificados con los datos obtenidos en los demás perfiles, que indican un incremento en la tasa de levantamiento tectónico, lo cual puede ser resultado de la tectónica, litología y/o factores climáticos presentes en la zona.



**Figura 5.11** a) Perfil longitudinal. b) perfil área de drenaje/distancia. c) Perfil gradiente/área de drenaje,

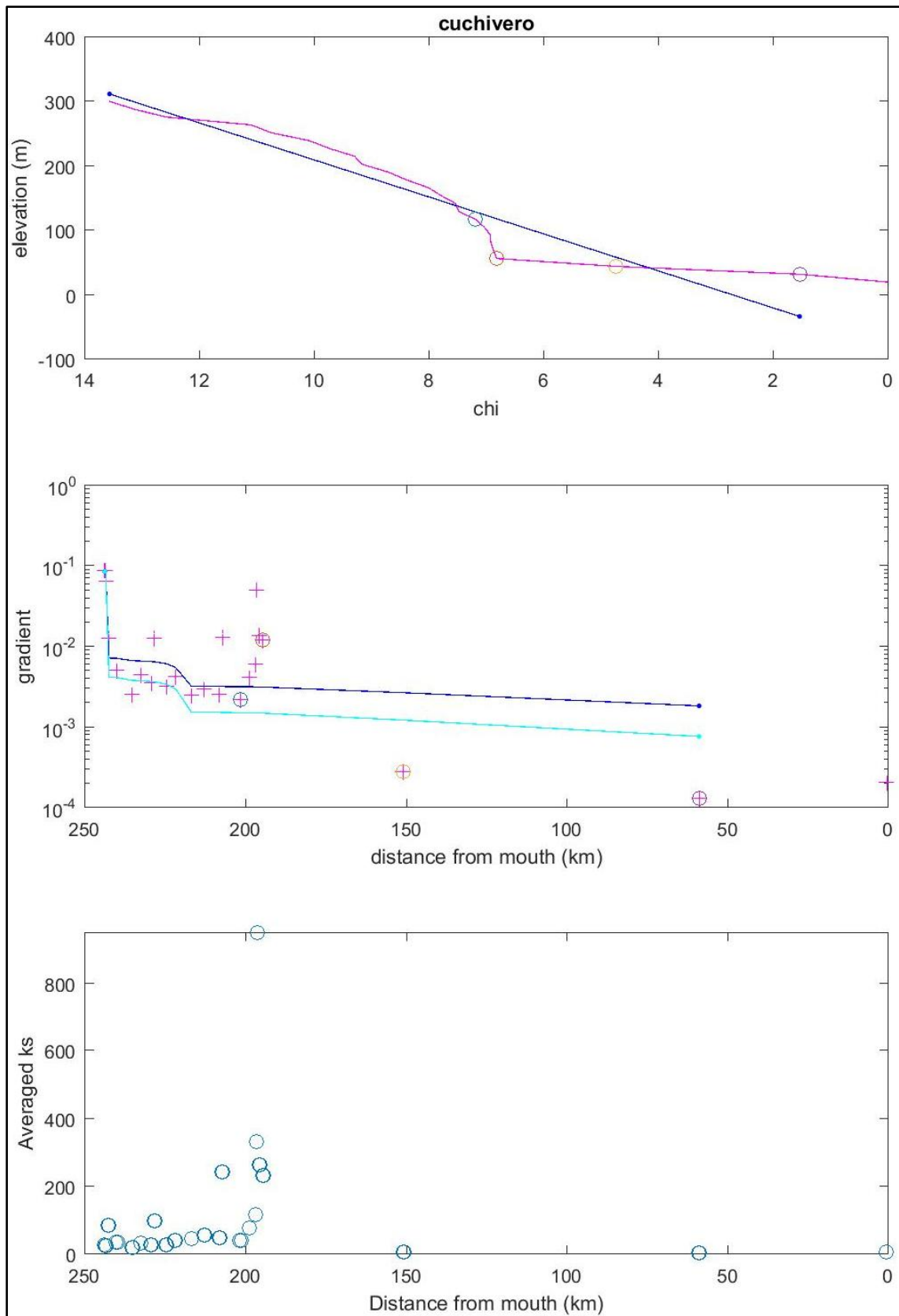
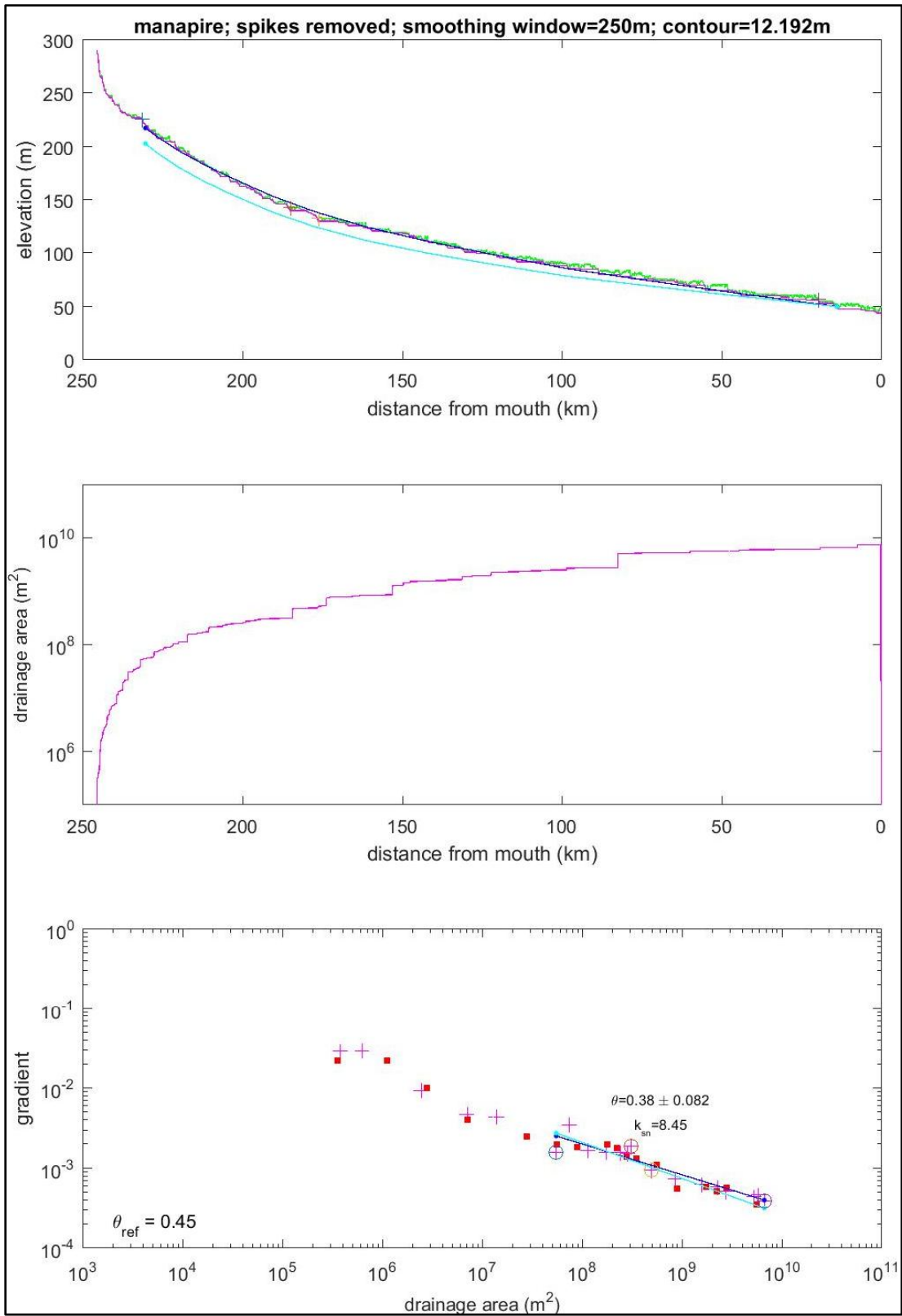
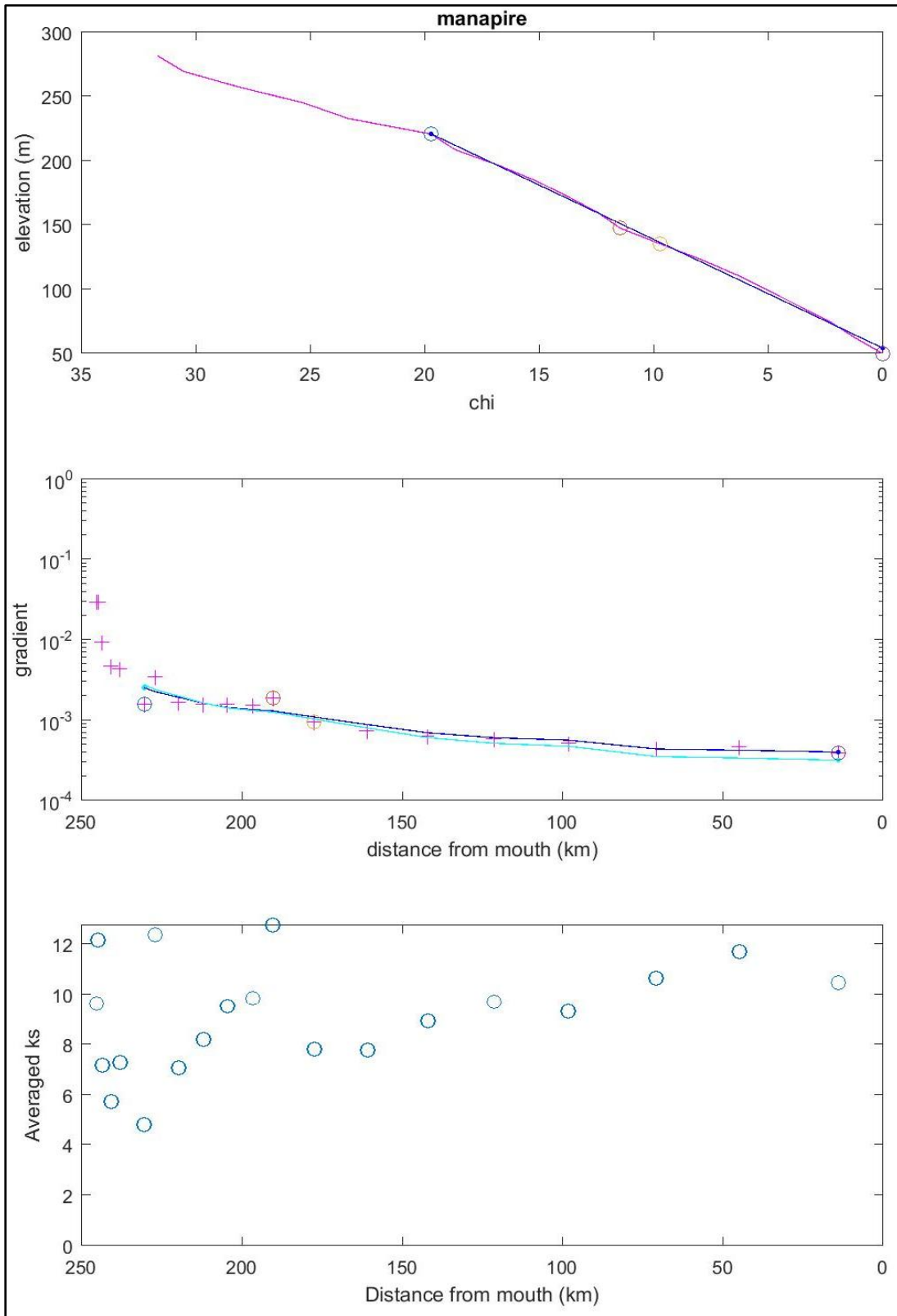


Figura 5.12 a) Perfil elevación /chi. b) gradiente/distancia. c) ksn/distancia.

Para el río Manapire puede observarse como el perfil longitudinal tiene una morfología cóncava bien marcada y típica con su desarrollo a partir de un área de drenaje de  $10^3\text{m}^2$ . Este perfil presenta pequeños knickpoints que no parecen representar un levantamiento tectónico, por lo que se infiere que este río podría estar en un equilibrio aparente (Figura 5.13a). La relación gradiente/distancia se ve con un aumento progresivo hacia la desembocadura sin muchas variaciones marcadas en el perfil (Figura 5.13b). Por su parte la relación gradiente/área de drenaje inicia en un área de drenaje mayor a  $10^5\text{m}^2$  con valores de  $\theta$  que van desde  $0,38 \pm 0,082$  que no representan mayores tasas de incisión. Su valor de  $R^2$  es de 0,89 lo cual significa que el modelo lineal es adecuado para describir la relación que existe entre estas variables, indicando que podría estar en equilibrio (Figura 5.13c). Para el perfil Chi ( $\chi$ ) se observa una buena linealidad con variaciones muy pequeñas. De esto último podemos deducir que no tiene marcados incrementos en la tasa de levantamiento (Figura 5.14a). Para el gráfico que relaciona la gradiente con la distancia se puede observar como su tendencia es progresiva y disminuye hacia la desembocadura sin saltos evidentes (Figura (5.14b)). por su parte el gráfico de  $k_{sn}/\text{distancia}$  presenta valores más o menos constantes a lo largo del perfil sin observarse cambios significativos en el mismo (Figura5.14c).



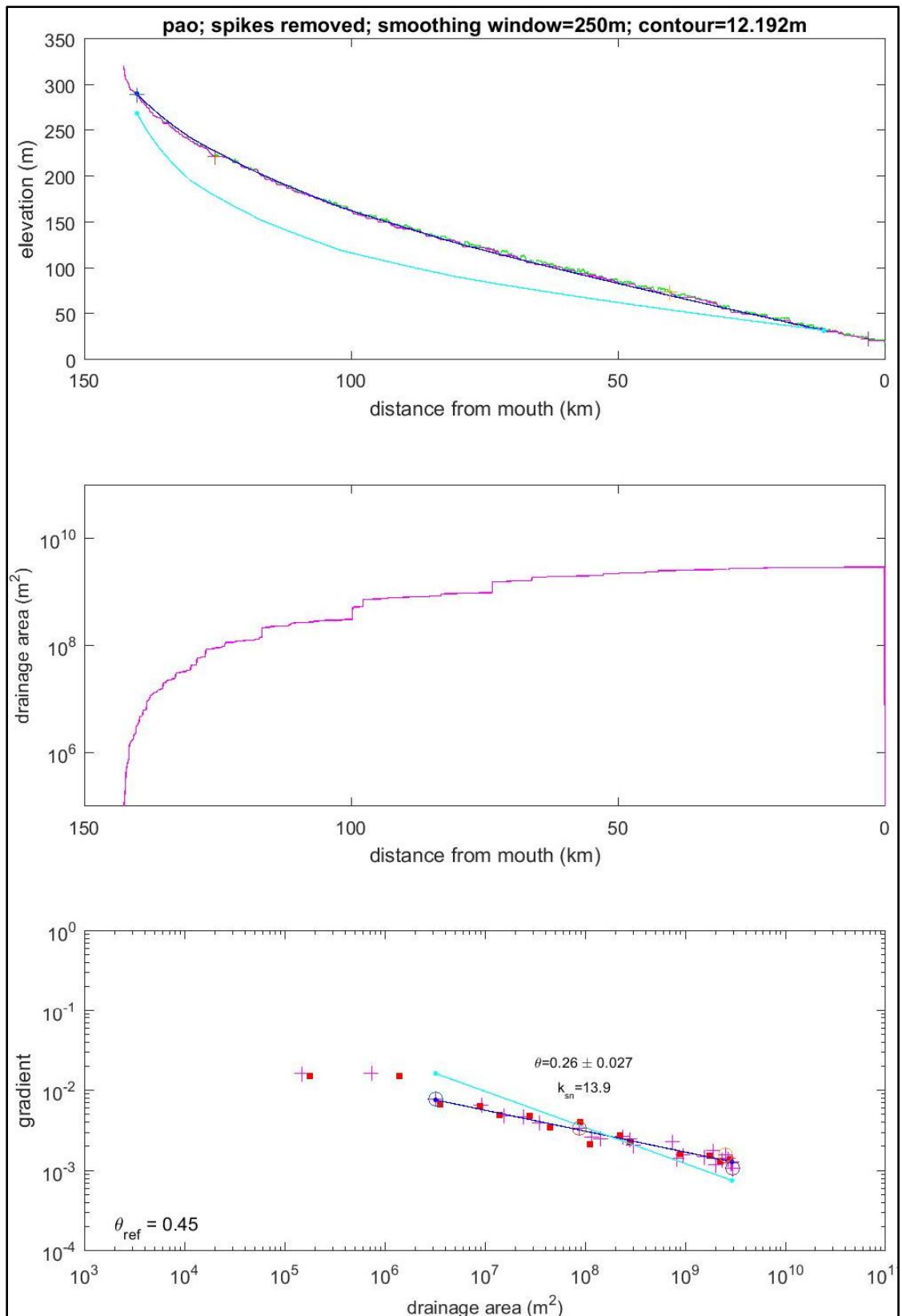
**Figura 5.13** a) Perfil longitudinal. b) perfil área de drenaje/distancia. c) Perfil gradiente/área de drenaje,



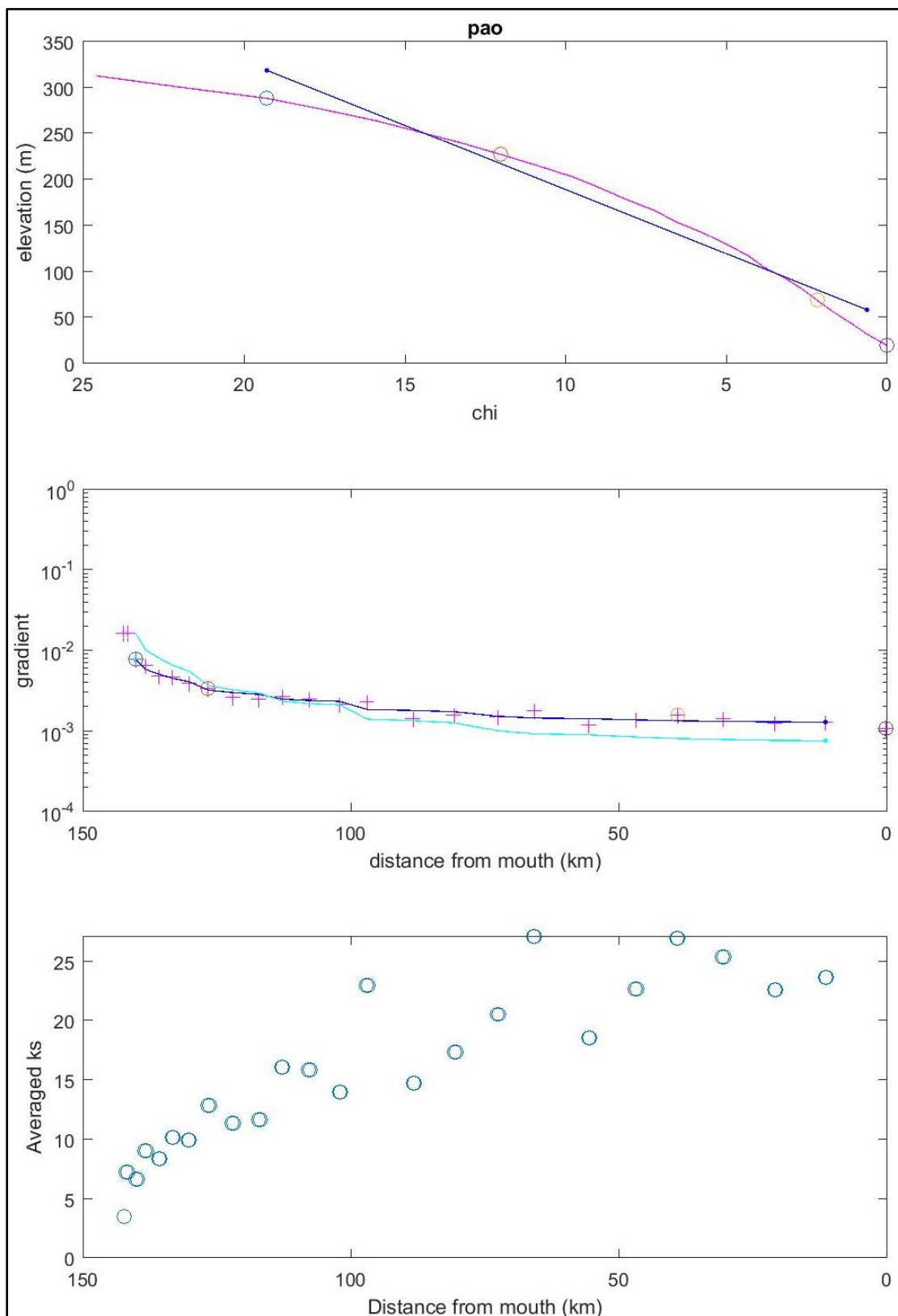
**Figura 5.14.** a) Perfil elevación /chi. b) gradiente/distancia. c) ksn/distancia.



Con respecto al río Pao se discrimina en su perfil longitudinal una forma típicamente cóncava que empieza su desarrollo en un área de drenaje mayor a  $10^3\text{m}^2$  con mínimas variaciones que podrían ser knickpoints muy poco significativos para desequilibrar la cuenca, por lo que se dice que el perfil se encuentra en equilibrio (Figura 5.15a). Para el perfil área de drenaje/distancia se puede observar como al igual que para el río Manapire este no presenta mayores variaciones son un aumento progresivo hacia la desembocadura (Figura 5.15b). Por su parte la relación gradiente y área de drenaje inicia en un área de drenaje mayor a  $10^5\text{m}^2$ . Con valores de  $\theta$  de  $0,26 \pm 0,027$ , lo cual refleja una tasa de incisión baja. Mientras que el valor de  $k_{sn}$  alcanza los 13,9. Por su parte el valor de  $R^2$  es de 0,95 indicaría que la relación entre estas variables es lineal por cual se infiere ser equilibrado (Figura 5.15c). El perfil Chi ( $\chi$ ) refleja una linealidad bastante marcada sin variaciones lo que significa un nulo incremento en la tasa de levantamiento de la cuenca (Figura 5.16a). Así mismo la relación entre el gradiente/distancia reflejan una distribución de valores que es más o menos constante a lo largo del perfil (Figura 5.16b). De igual manera se puede observar en el perfil de  $k_{sn}$ /distancia donde los valores a lo largo del perfil van aumentando poco a poco de forma progresiva a lo largo del perfil (Figura 5.16c)



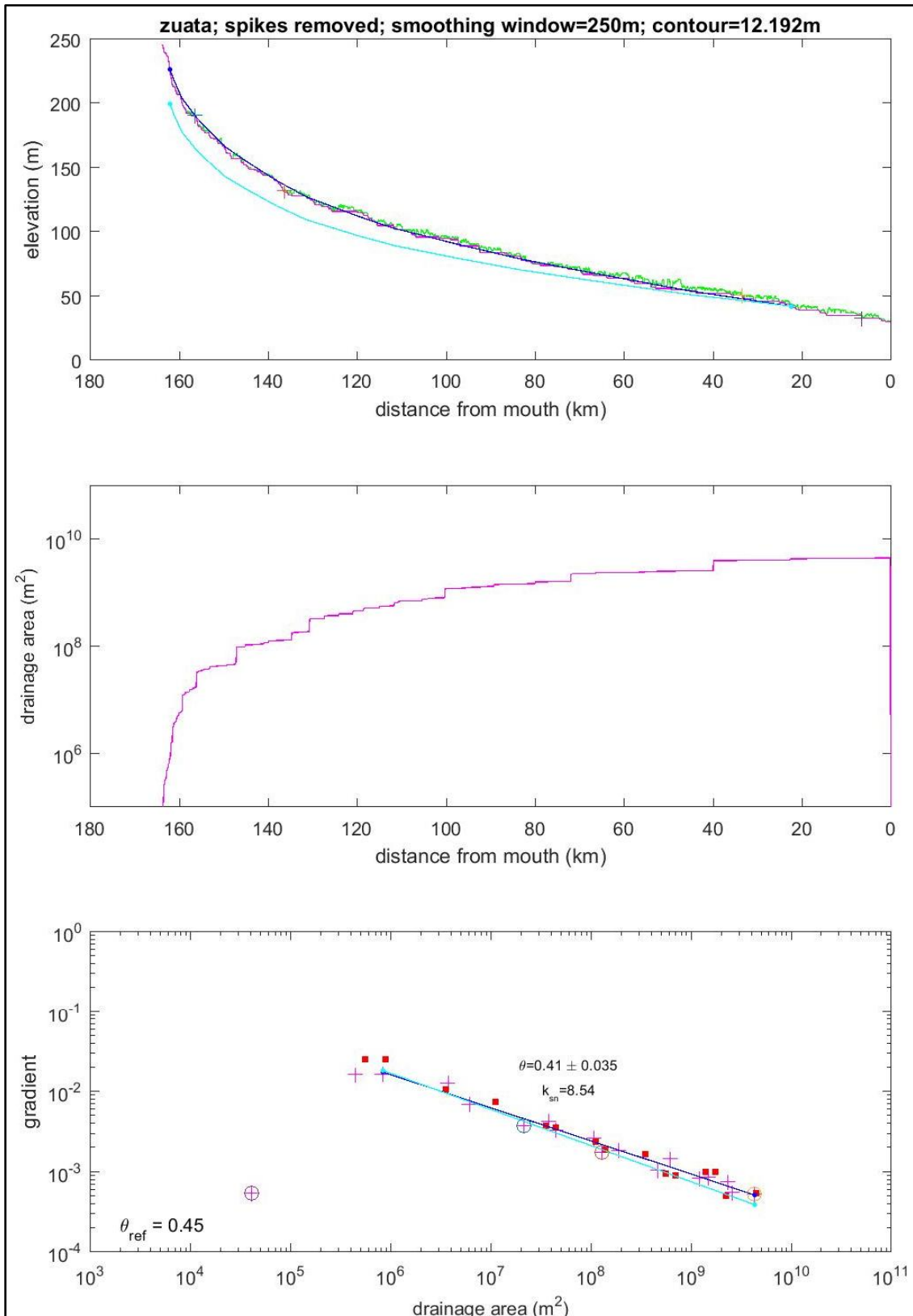
**Figura 5.15** a) Perfil longitudinal. b) perfil área de drenaje/distancia. c) Perfil gradiente/área de drenaje,



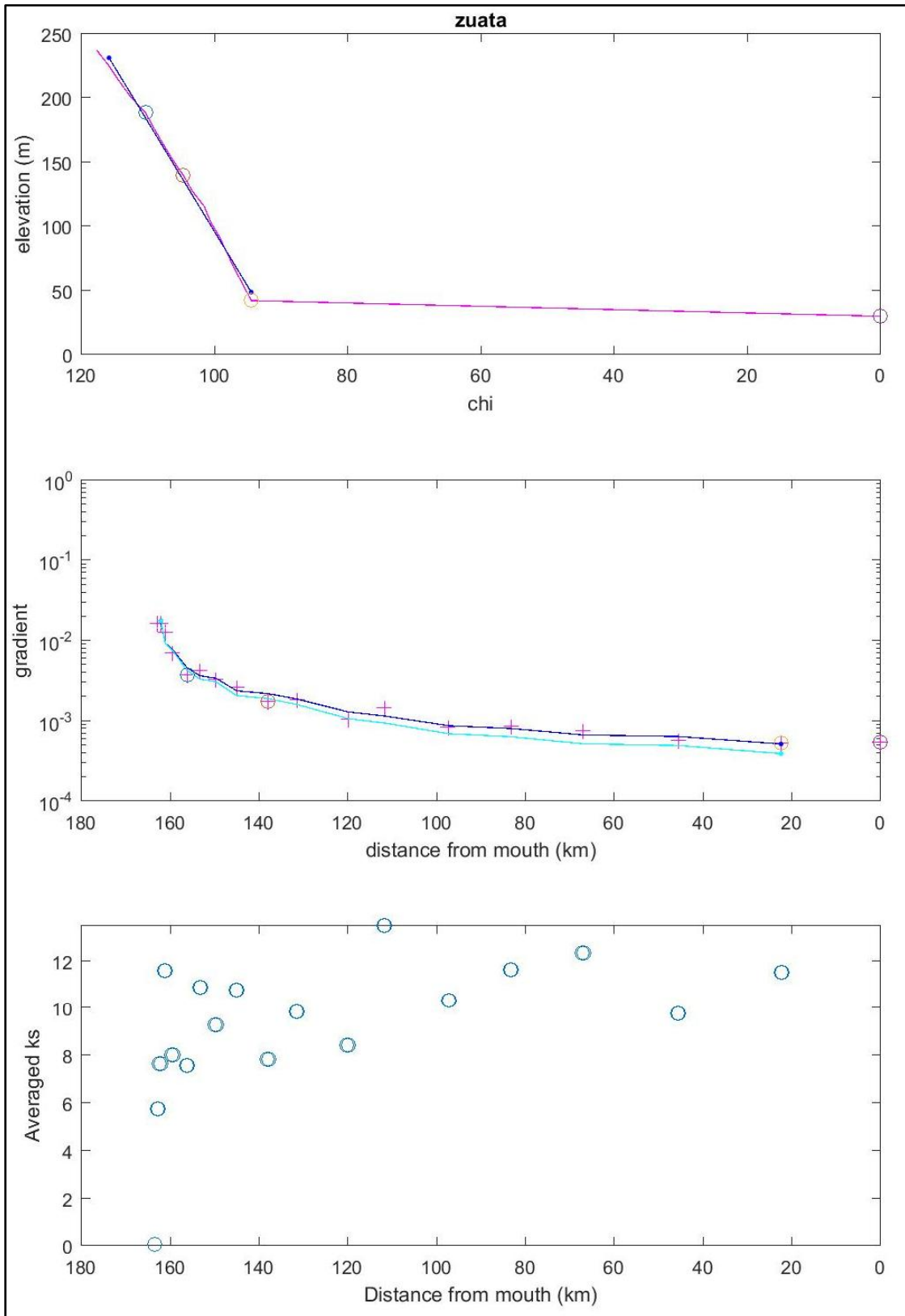
**Figura 5.16.** a) Perfil elevación /chi. b) gradiente/distancia. c) ksn/distancia.

Por último, en el perfil del río Zuata se puede observar que este presenta una morfología bastante cóncava que empieza su desarrollo en un área de drenaje mayor a  $10^3\text{m}^2$ . Con un perfil suavizado que no presenta knickpoints importantes que puedan modificar el perfil, por lo que se asume no tiene levantamientos tectónicos importantes que puedan afectar el equilibrio del río (Figura 5.17a). Por su lado el perfil que relaciona el área de drenaje con la distancia se muestra en aumento progresivo hacia la desembocadura con muy pocas variaciones en el mismo (Figura 5.17b). La relación entre el gradiente y el área de drenaje empieza en un área de drenaje mayor a  $10^5\text{m}^2$ . Sus valores de  $\theta$  son de  $0,41 \pm 0,036$ ; de  $k_{sn}$  de 8,54 y de  $R^2$  es de 0,95 que por su parte refleja que la relación entre las variables lineal por lo tanto se dice que el perfil se muestra en equilibrio (Figura 5.17c). Mientras el Gráfico Chi ( $\chi$ ) a pesar de parecer lineal tiene una interrupción la cual no se le aprecia razón alguna que pueda justificar este salto, debido a que no hay knickpoints importantes que puedan modificar el equilibrio del perfil (Figura 5.18a). En cambio en el perfil que muestra la relación gradiente/distancia se puede observar que la disminución es constante a lo largo del perfil sin saltos en los valores (Figura 5.18b). Así mismo el perfil de  $k_{sn}$ /gradiente se muestra más o menos constante a lo largo del todo el perfil lo que es indicativo de que no hay un desequilibrio en las tasas de incisión del río (Figura 5.18c)

Como se puede observar las similitudes entre los perfiles de la zona norte del río Orinoco son muy marcadas dejando notar como no hay knickpoints importantes que puedan modificar el equilibrio que existe en los ríos de esta zona. Lo cual fue corroborado con los otros perfiles graficados donde no se observan variaciones marcadas.

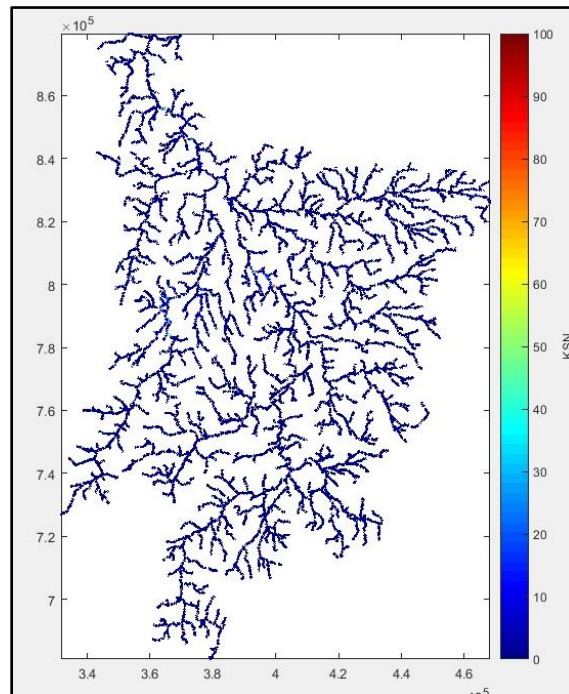


**Figura 5.17** a) Perfil longitudinal. b) perfil área de drenaje/distancia. c) Perfil gradiente/área de drenaje,

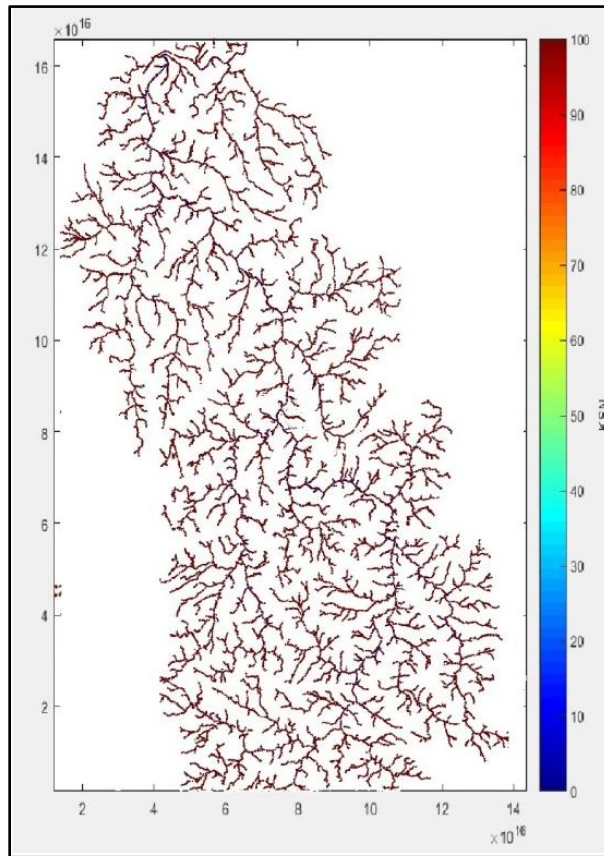


**Figura 5.18** a) Perfil elevación /chi. b) gradiente/distancia. c)  $k_{sn}$ /distancia.

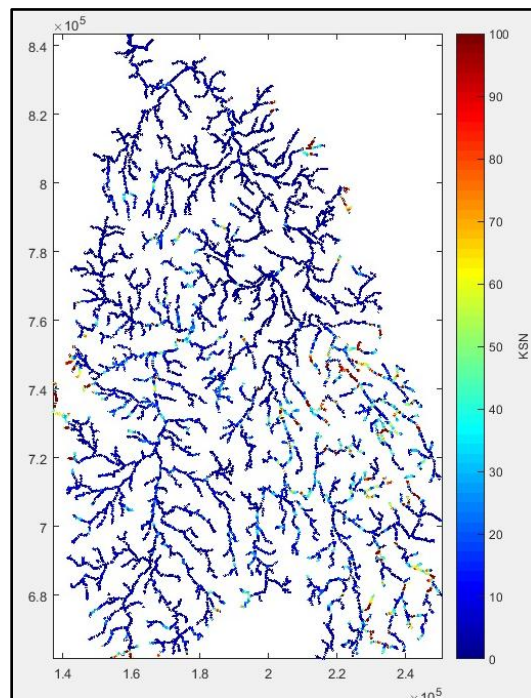
Los valores  $k_s$  representan que el índice de verticalidad del río, Cuando existen cambios debidos a un levantamiento tectónico, forzamiento climático o a la litología, la relación entre las pendientes y área de drenaje cambia, lo cual puede incrementar el valor de  $k_s$ , esto corresponde normalmente con la presencia del *knickpoint* (Castillo, Muños – Salinas y Arce, 2015). Por lo tanto fue graficado en un mapa los valores del índice de verticalidad normalizado ( $k_{sn}$ ). Para comparar con los knickpoints y la litología que atraviesa los distintos ríos. Lo cual también se puede observar en el perfil “average  $k_s$  vs distance from the mouth (km)”, y se puede observar en el perfil e igual en el mapa los saltos en los valores  $k_{sn}$  coinciden con los mayores knickpoints encontrados en los perfiles de cada río. (Ver Figuras 5.19, 5.20, 5.21, 5.22, 5.23, 5.24)



**Figura 5.19** Valor  $k_{sn}$  del río Aro

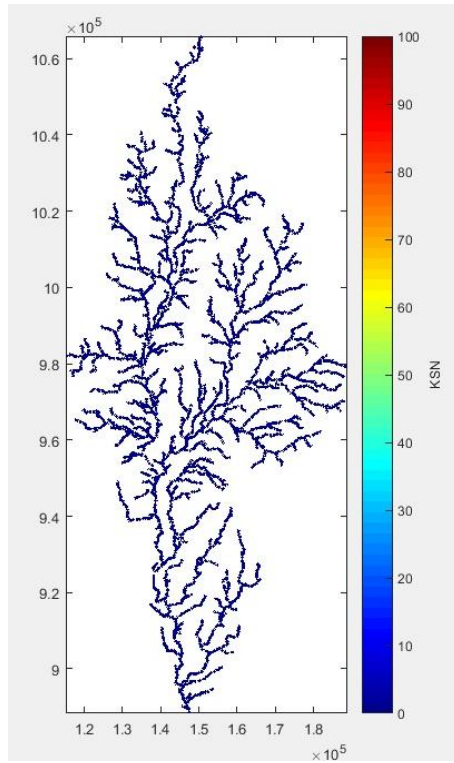


**Figura 5.20** Valor ksn del río Caura

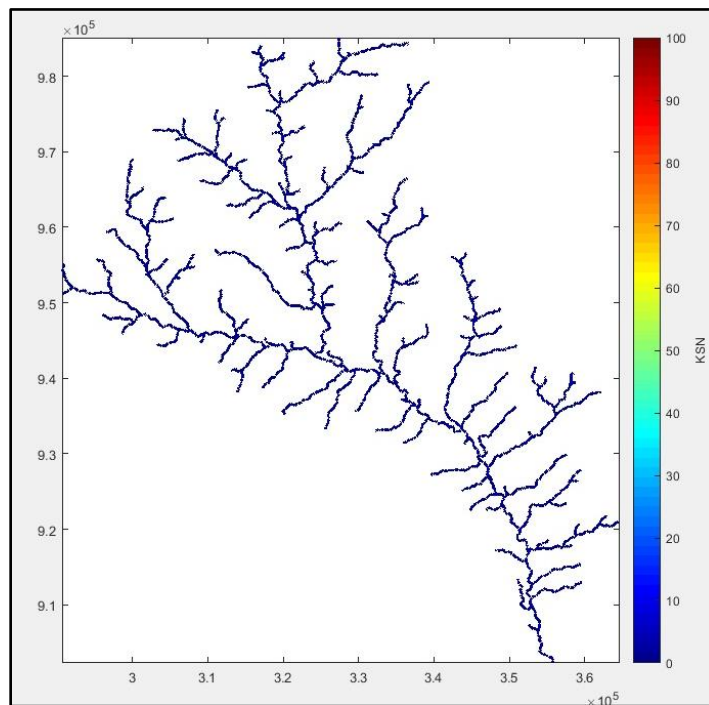


**Figura 5.21** Valor ksn del río Cuchivero

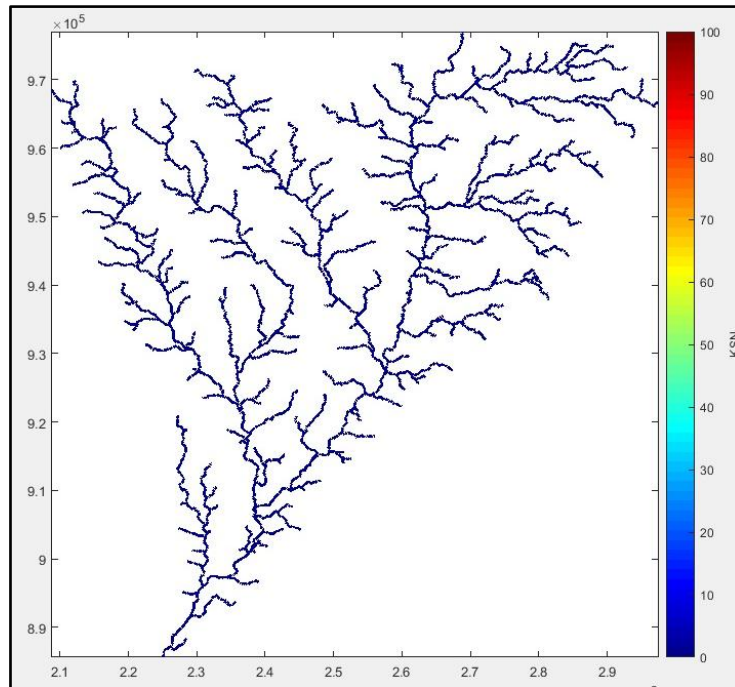




**Figura 5.22** Valor ksn del río Manapire



**Figura 5.23** Valor ksn del río Pao



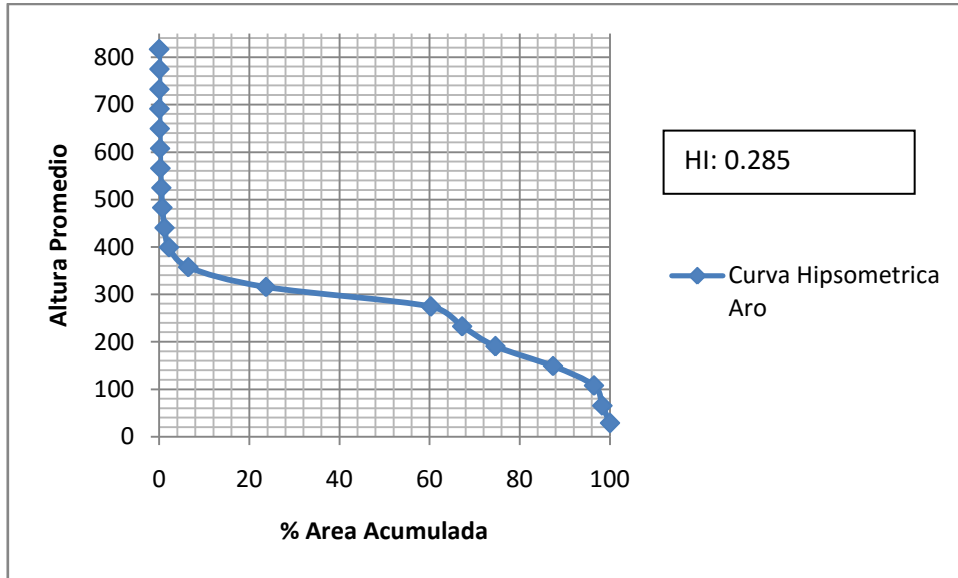
**Figura 5.24** Valor ksn del río Zuata

### 5.2.1 Análisis Hipsométrico

Para estimar el potencial evolutivo de las subcuencas de los ríos analizados se generaron curvas hipsométricas de cada una, así como el cálculo de la integral hipsométrica (HI).

#### 5.2.1.1 Río Aro

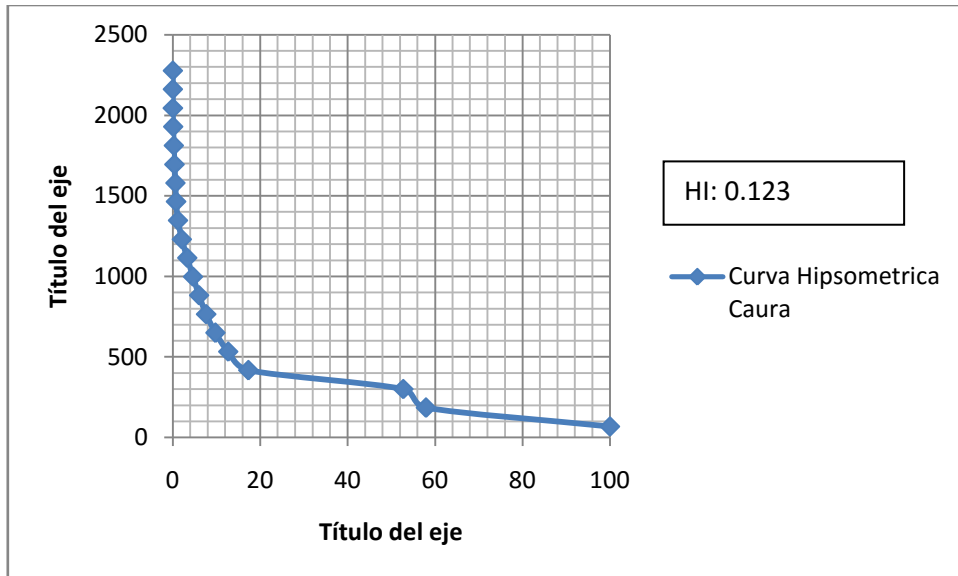
La curva hipsométrica de la cuenca del río Aro reflejada en la Figura 5.25 muestra que esta se encuentra en un estado de intermedio entre la fase de equilibrio y el estado de desequilibrio, y puede ser comparado con su integral hipsométrica la cual al tener un valor igual a 0,285 refleja claramente este estado inferido en la curva hipsométrica. Esto significa que obviamente está evolucionando hacia la etapa de madurez, lo que implicaría un potencial erosivo considerable.



**Figura 5.25** Curva Hipsométrica de la cuenca del río Aro

### 5.2.1.2 Río Caura

La curva hipsométrica mostrada en la Figura 5.26 para esta cuenca indica que esta se encuentra en un estado de vejez o senectud, lo que es evidencia de que existe una predominancia de los procesos erosivos sobre los procesos de alzamiento o tectónicos, presentando así valles amplios y escarpados. Esto también es reafirmado con el valor de la integral hipsométrica debido a que esta tiene un valor de 0,123 el cual está muy por debajo del 30%.



**Figura 5.26** Curva Hipsométrica de la cuenca del río Caura

### 5.2.1.3 Río Cuchivero

La curva hipsométrica generada mostrada en la Figura 5.27 evidencia claramente que la cuenca se encuentra en una etapa de senectud, lo cual fue verificado al obtener el valor de la integral hipsométrica de 0,167 siendo que este valor está muy por debajo del 30%. Lo que es indicativo de que es una cuenca mayormente erosionada con valles extensos y cumbres escarpadas.

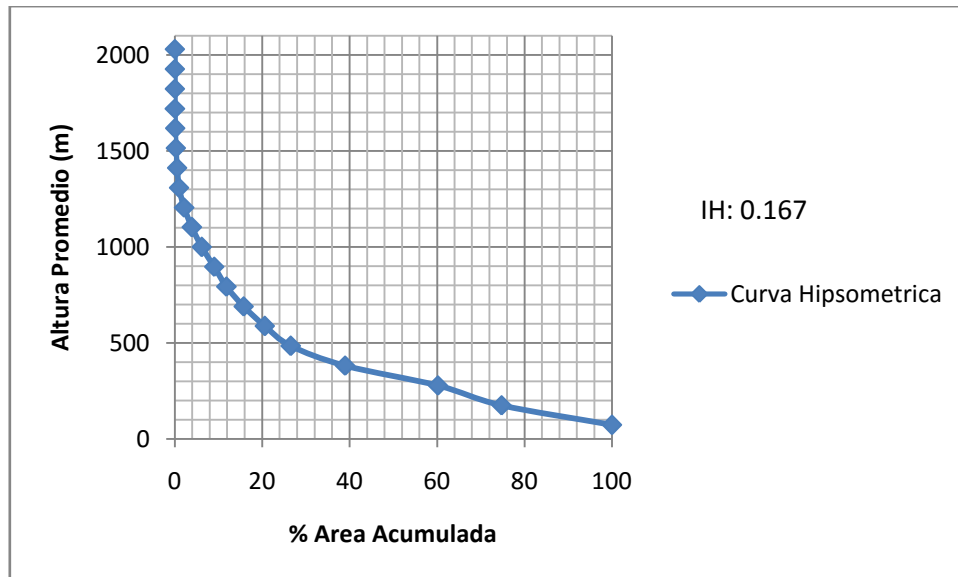
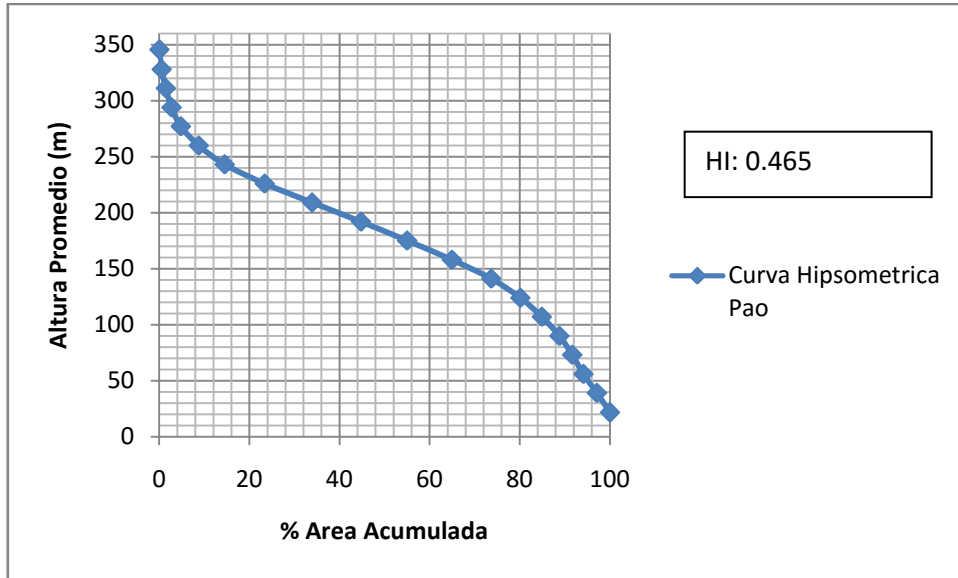


Figura 5.27 Curva Hipsométrica de la cuenca del río Cuchivero

### 5.2.1.4 Río Pao

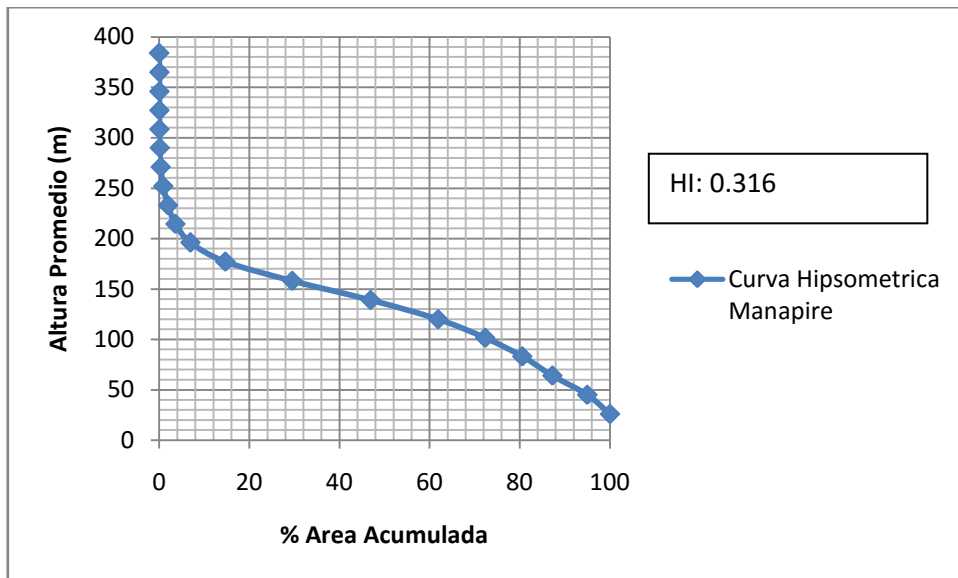
De acuerdo con la curva hipsométrica mostrada en la Figura 5.28 para la cuenca del río Pao se puede notar que esta se encuentra en un estado de equilibrio o se encuentra en una fase madura. Su integral hipsométrica confirma lo evidenciado en la curva debido a que su valor es igual a 0,465 el cual está muy aproximado al 47%.



**Figura 5.28** Curva Hipsométrica de la cuenca del río Pao

#### 5.2.1.5 Río Manapire

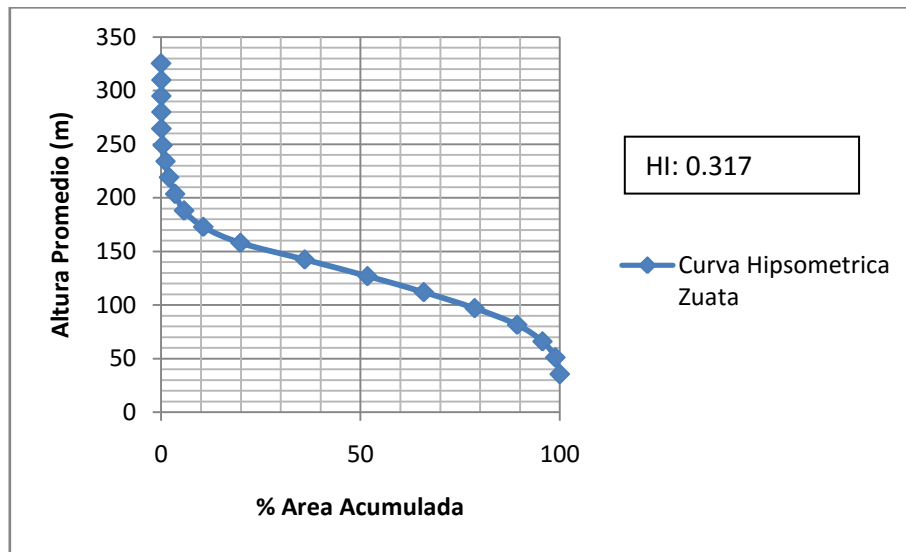
Los resultados evidenciados en la curva hipsométrica de la cuenca del río Manapire muestran que la misma se encuentra en un estado intermedio, es decir se puede inferir que está entre la fase de madurez y la etapa de senectud o vejez con tendencia la etapa de vejez, lo mismo indica la integral hipsométrica calculada al tener valores por debajo de 0,316 el cual cómo se puede observar esta rondando el 30%. (Ver Figura 5.29)



**Figura 5.29** Curva Hipsométrica de la cuenca del río Manapire

### 5.2.1.6 Río Zuata

La curva hipsométrica de la cuenca del río Zuata mostrada en la Figura 5.30 es indicativa que esta se encuentra en un estado intermedio entre la etapa de equilibrio relativo o madurez Davisiana y desequilibrio o vejez Davisiana, donde este sigue su evolución hacia la etapa de madurez lo cual implicaría un gran potencial erosivo. Esto mismo se encuentra evidenciado por el resultado obtenido de la integral hipsométrica de 0,317 siendo este valor muy cercano al 30%.



**Figura 5.30** curva hipsométrica de la cuenca del río Zuata

### 5.3 ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE GRADIENTE DE FLUJO SL

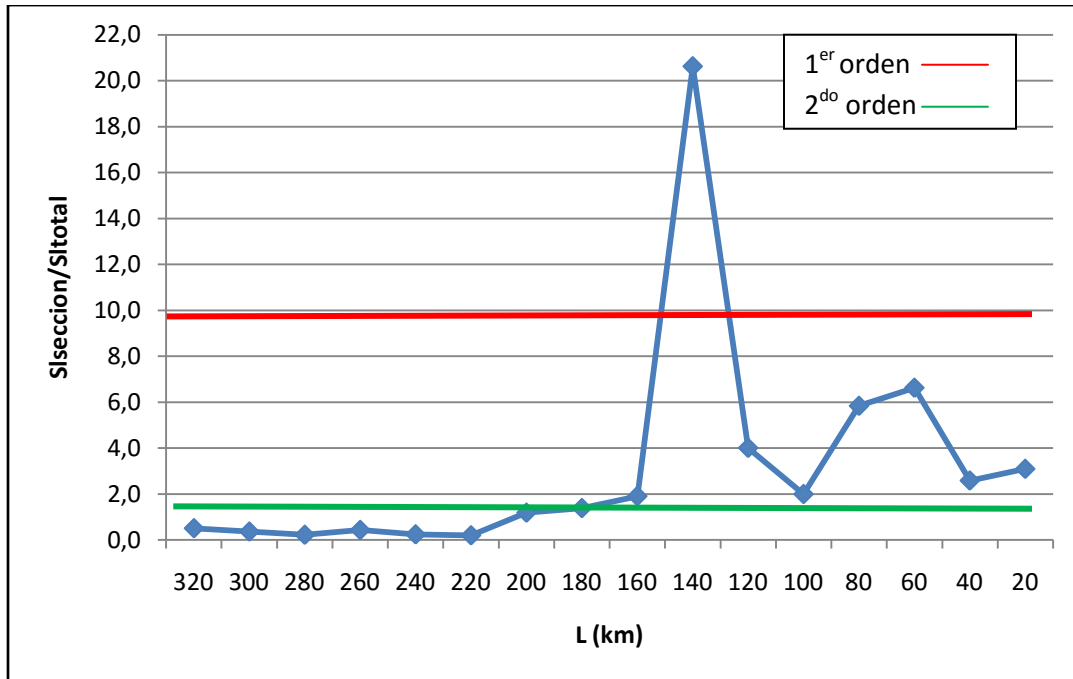
El índice SL fue calculado con la única idea de discriminar anomalías que pudiesen coincidir con los knickpoints identificados en el perfil longitudinal de cada río.

**Tabla 5.2** resultados de los valores anómalos SL de los Ríos analizados. En verde: no hay anomalías, en amarillo: anomalías de 2<sup>do</sup> orden y en rojo: anomalías de 1<sup>er</sup> orden.

Aro		Caura		Cuchivero		Manapire		Pao		Zuata	
L	SL <sub>seccion</sub> / SL <sub>total</sub>	L	SL <sub>seccion</sub> / SL <sub>total</sub>	L	SL <sub>seccion</sub> / SL <sub>total</sub>	L	SL <sub>seccion</sub> / SL <sub>total</sub>	L	SL <sub>seccion</sub> / SL <sub>total</sub>	L	SL <sub>seccion</sub> / SL <sub>total</sub>
320	0,51	500	3,38	240	1,25	240	0,88	140	0,96	160	1,34
300	0,36	480	0,39	220	2,30	220	1,56	120	1,31	140	1,32
280	0,22	460	0,22	200	3,55	200	1,68	100	1,56	120	1,55
260	0,43	440	0,28	180	0,08	180	1,56	80	1,93	100	2,10
240	0,24	420	0,31	160	0,73	160	1,63	60	2,05	80	1,50
220	0,20	400	0,14	140	0,51	140	2,02	40	3,12	60	2,02
200	1,18	380	0,07	120	0,15	120	1,67	20	5,19	40	2,62
180	1,38	360	0,30	100	0,54	100	2,16			20	2,12
160	1,90	340	0,37	80	0,21	80	1,98				
140	20,63	300	7,61	60	2,09	60	2,80				
120	4,01	280	0,00	40	0,00	40	1,25				
100	1,99	260	0,00	20	2,01	20	4,14				
80	5,84	240	0,36								
60	6,63	220	0,00								
40	2,58	200	0,61								
20	3,09	180	0,00								
		160	0,07								
		140	0,52								
		120	0,00								
		100	0,00								
		80	0,00								
		60	0,92								
		40	0,67								
		20	0,00								

Para los Ríos que están sur del río Orinoco (Aro, Caura, y Cuchivero) se encontraron anomalías de los valores SL muy marcadas que coinciden con los knickpoints identificados en el perfil. En la Figura 5.31 se puede observar para el río Aro que el primer knickpoint identificado es una anomalía de 1<sup>er</sup> orden (está por encima de la línea roja), lo que significa que es una zona muy empinada pero sin cambios litológicos y los otros 4 knickpoints identificados cumplen con el criterio de anomalías de 2<sup>do</sup> orden que solo son “empinados”

(están entre la línea verde y la línea roja), siendo estos últimos los únicos que presentan cambios litológicos que pudieran generar este knickpoint. Para el río Caura también se encontraron anomalías, pero solo de 2<sup>do</sup> orden, es decir que son solo empinados, solo tenemos dos valores SL anómalos que coinciden con los knickpoints primero y tercero en el perfil longitudinal, y no presenta ningún cambio litológico significativo (Ver Figura 5.32). Para el río Cuchivero se puede observar en la Figura 5.33 que se obtuvieron 4 valores anómalos pero dos de ellos se encuentran muy poco por encima de 2 y como no coinciden con algún knickpoint no fueron considerados ya que es insignificante la anomalía, solo se evaluarán aquellos dos que están entre 200 – 220m que parecen coincidir con la zona de knickpoints identificadas en el perfil, pero de igual manera no presentan ningún cambio litológico que pueda afectar el equilibrio del perfil.



**Figura 5.31.** Índices SL anómalos del río Aro



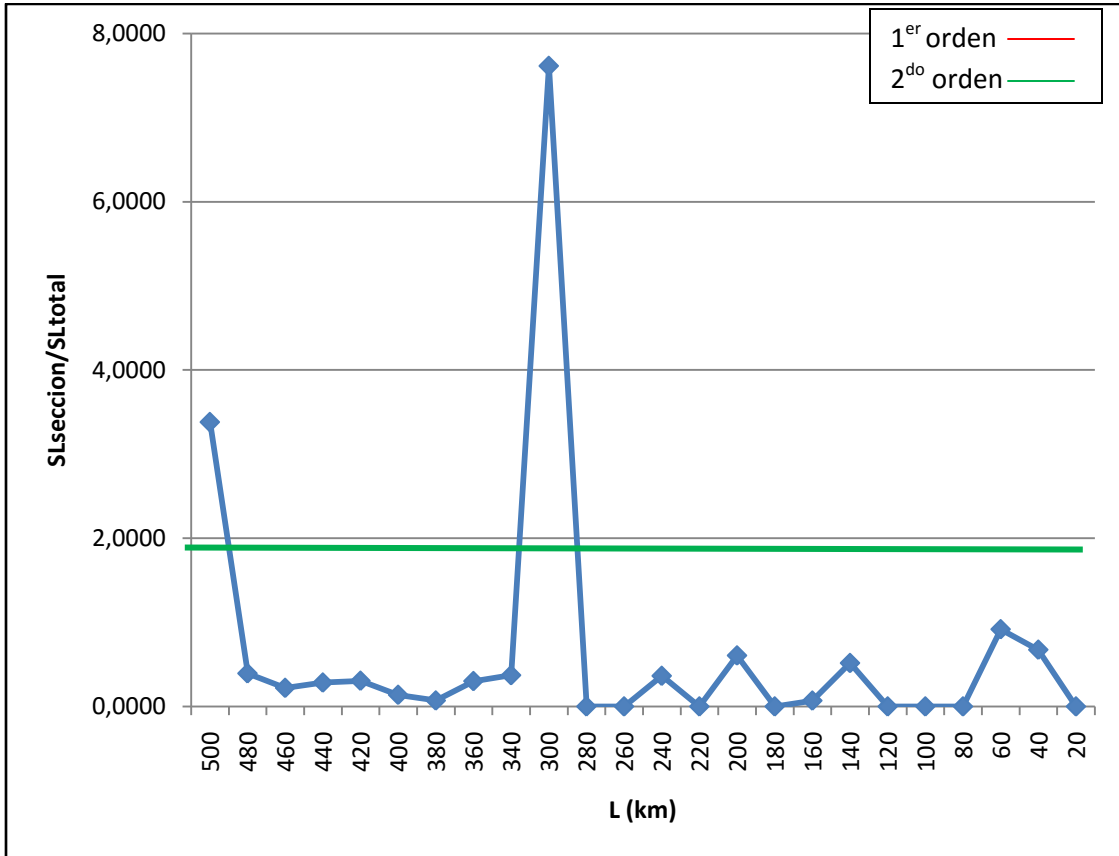


Figura 5.32. Índices SL anómalos del río Caura

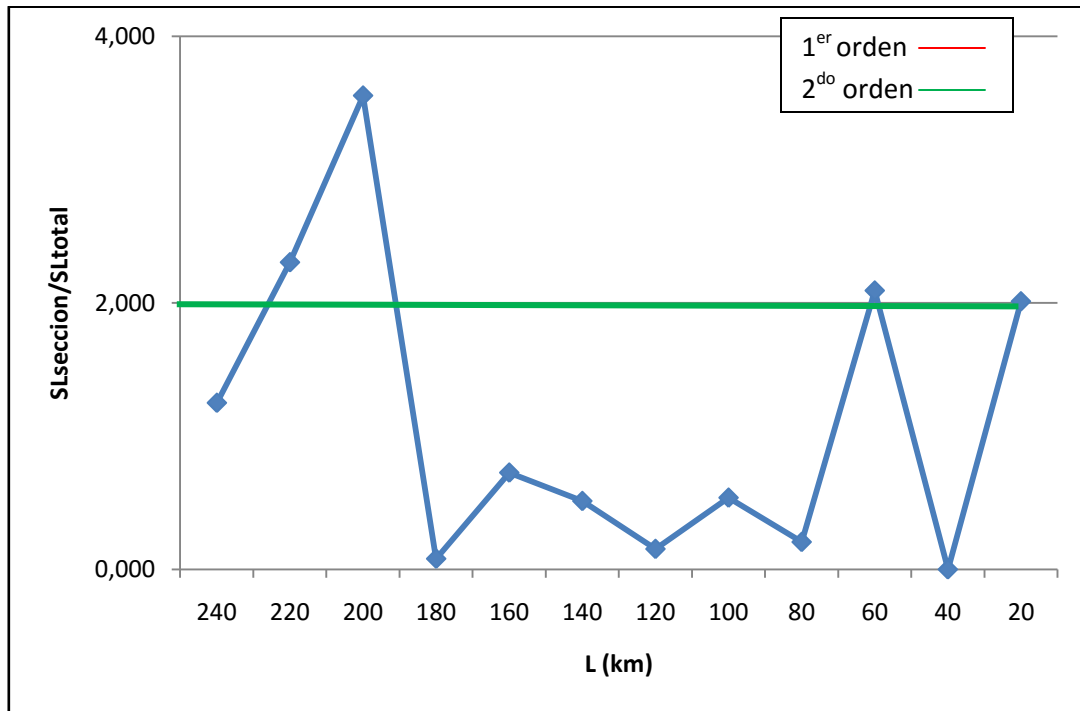


Figura 5.33. Índices SL anómalos del río Cuchivero

Por su parte las anomalías encontradas en los ríos que están al norte del río Orinoco (Manapire, Pao y Zuata), tienen anomalías que son menos marcadas y que aunque coinciden con las zonas de knickpoints encontradas en el perfil estos no tienen mucha relevancia, ya que son knickpoints pequeños que no reflejan desequilibrio en el perfil. En la Figura 5.34 se puede observar para el río Manapire las anomalías en el SL son 4 pero las primeras 3 son valores muy poco por encima de 2 y no tienen coincidencia con ningún knickpoint encontrado en el perfil, al igual que en los casos anteriores solo serán consideradas la anomalía mayor que se encuentra en el knickpoint 4, que representaría una anomalía de 2<sup>do</sup> orden es decir que en esa zona sólo está empinada. Para el río Pao las anomalías encontradas son 3 pero la primera que está aproximadamente a 60 km de la desembocadura no es significativa, por lo que sólo se analizará la que está en los 40 y 20 km de la desembocadura respectivamente y estas coinciden con pequeños knickpoints encontrados en el perfil (Ver Figura5.35). Para el río Zuata se puede observar en la Figura5.36 que las anomalías encontradas no resultaron significativas ya que sólo están por encima de 2 por algunos decimales, y lo que se confirma ya que los knickpoints encontrados en el perfil del río Zuata son muy pequeños y no contribuyen al desequilibrio del mismo. Ninguna de estas anomalías representaría cambios litológicos importantes que pudieran representar la causa de la misma.

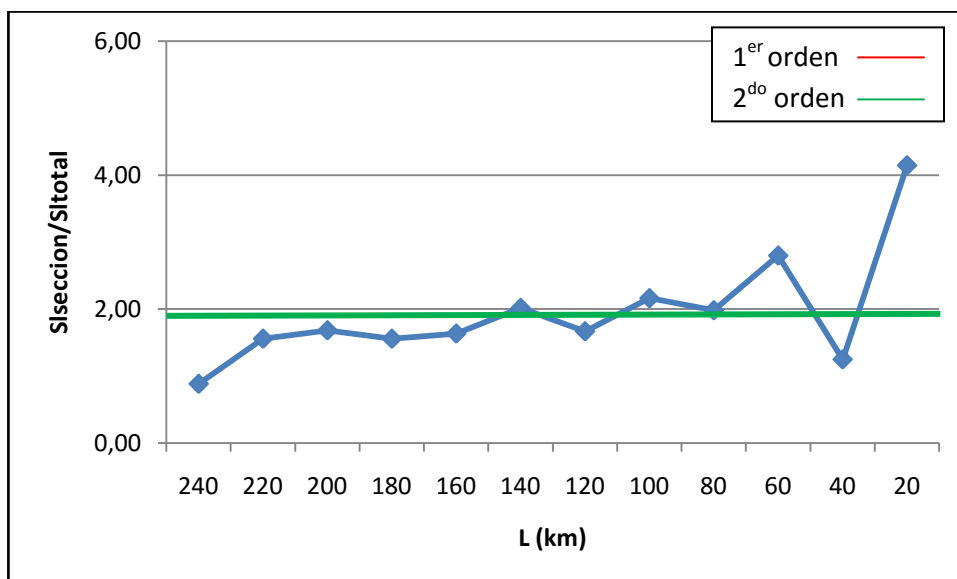


Figura 5.34. Índices SL anómalos del río Manapire

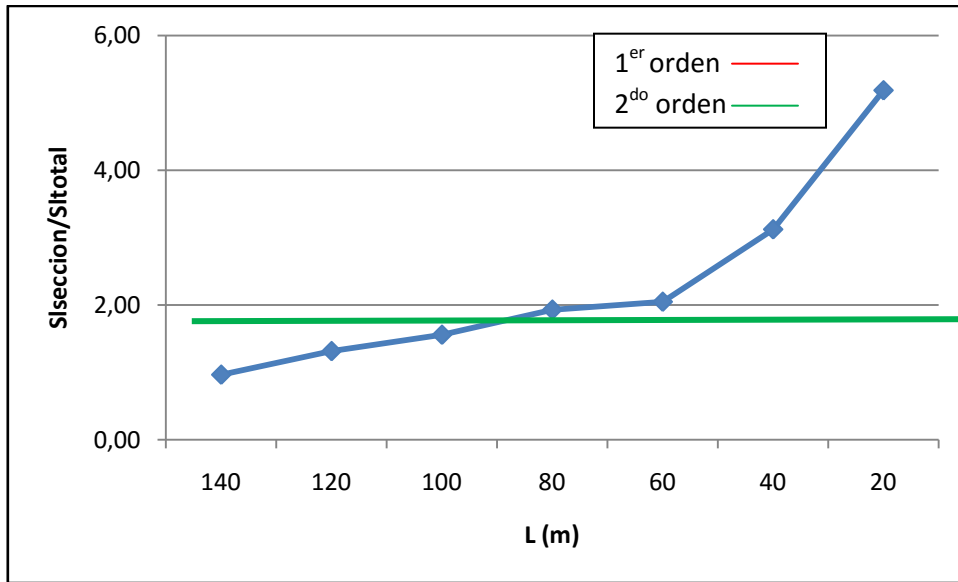


Figura 5.35. Índices SL anómalos del río Pao

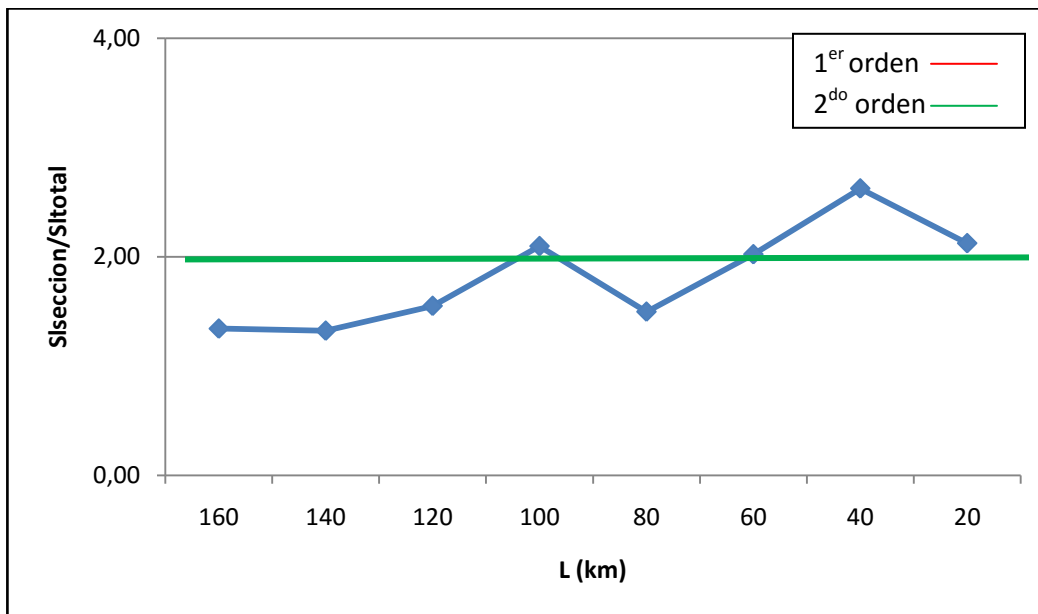


Figura 5.36. Índices SL anómalos del río Zuata

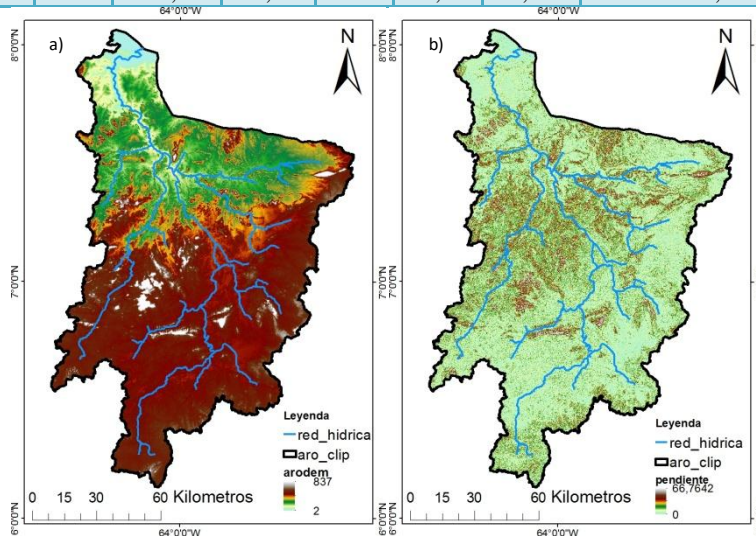
## 5.4 CLASIFICACION FORMAL DE LA SUPERFICIE DEL AREA DE ESTUDIO MEDIANTE ANÁLISIS DE ATRIBUTOS DEL TERRENO

### 5.4.1 Atributos primarios

Entre los atributos primarios se calcularon los valores de área, perímetro, longitud de la cuenca, longitud del cauce principal, pendiente y elevación. Estos valores son resumidos en tablas y presentado en sus respectivos mapas

**Tabla 5.3** atributos primarios calculados para la cuenca del río Aro

Área (km <sup>2</sup> )		Longitud cuenca (km)		Longitud Cauce (km)		Perímetro (km)	
15591,94		213,46		334,91		1058,95	
Elevación (m)				Pendiente (°)			
Min	max	media	SD	min	max	media	SD
2	837	240,26	85,15	0	66,76	5,23	4,67

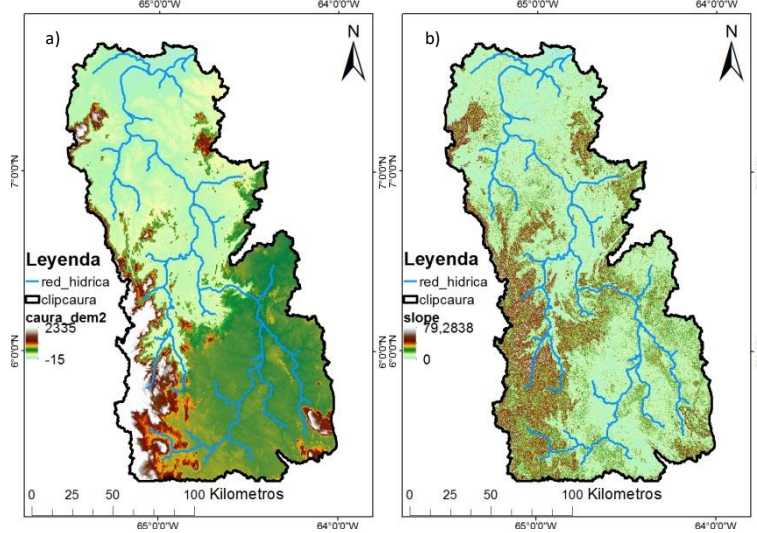


**Figura 5.37** Mapa de la cuenca del río Aro. a) Mapa de Elevación b) Mapa de pendiente

La cuenca del río Aro tiene un área de 15591,94 km<sup>2</sup> la que se puede clasificar en una cuenca muy grande, con un perímetro de 1058,956 km y una longitud de 213,467 km. Mientras que la longitud del cauce principal es de 334,919 km. Presenta elevaciones medias de 240,265 ± 85,155 m, teniendo los valores más altos hacia la zona sur hasta 837 m, y como se puede observar en la Figura 5.37 sus valores van disminuyendo a medida que se acerca a la desembocadura del río en la cuenca del río Orinoco hacia el norte del mismo hasta alcanzar valores de 2 m. la pendiente oscila de valores mínimos de 0° a valores máximos de 66,764°, con una pendiente media de 5,232 ± 4,677. (Ver Tabla 5.3)

**Tabla 5.4** Atributos primarios calculados para la cuenca del río Caura

Área (km <sup>2</sup> )		Longitud cuenca (km)		Longitud cauce (km)		Perímetro (km)	
28074,85		291,17		503,25		1318,33	
Elevación (m)				Pendiente (°)			
Min	max	media	SD	min	max	media	SD
-15	2335	275,06	277,48	0	79,28	7,360	7,69

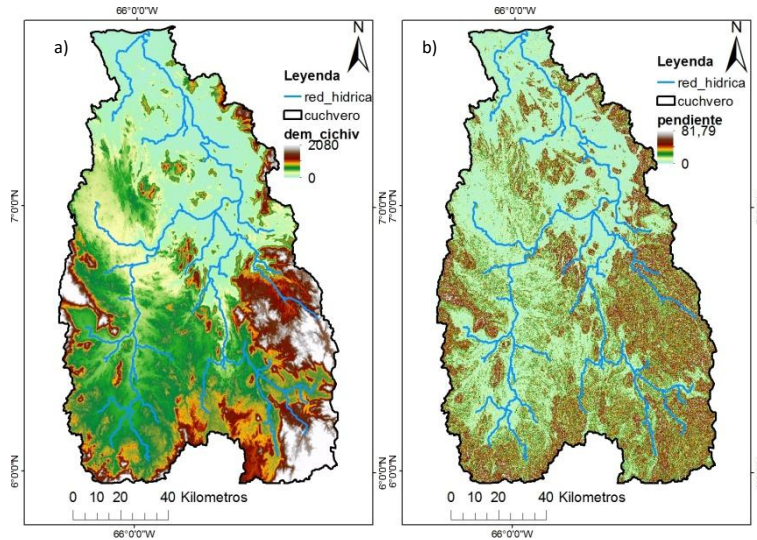


**Figura 5.38** Mapa de la cuenca del río Caura. a) Mapa de Elevación b) Mapa de pendiente c) Relieve 10km d) Relieve 20km e) Relieve 50km

La cuenca del río Caura posee un área de 28074,85 km<sup>2</sup> por lo que se puede decir que es una cuenca muy grande. Siendo esta la cuenca con mayor extensión entre las cuencas aquí estudiadas. Con un perímetro de 1318,33 km y una longitud promedio de 291,17 km. La longitud del cauce alcanza valores de 503,25 km. Esta cuenca tiene elevaciones medias promedio de 275,06 ± 277,48 m; y como se puede observar en la Figura 5.38 alcanzan su máxima elevación hacia la zona periférica oeste y sureste de la cuenca, la cual puede alcanzar elevaciones de hasta 2335 m, y las zonas más bajas se ubican en toda la parte central de la cuenca alcanzando el mínimo hacia el norte de la cuenca hasta alcanzar valores de -15 m, con pendiente que pueden alcanzar en su máximos hasta 79,28° y en sus mínimos un 0° de pendiente. Con valores promedio de 7,60 ± 7,69°. (Ver Tabla 5.4)

**Tabla 5.5** Atributos primarios calculados para la cuenca del río Cuchivero

Área (km <sup>2</sup> )		Longitud cuenca (km)		Longitud cauce (km)		Perímetro (km)	
15832,05		203		312,79		793,46	
Elevación (m)				Pendiente (°)			
Min	max	media	SD	min	max	media	SD
0	2080	347,880	297,189	0	81,79	10,243	8,846

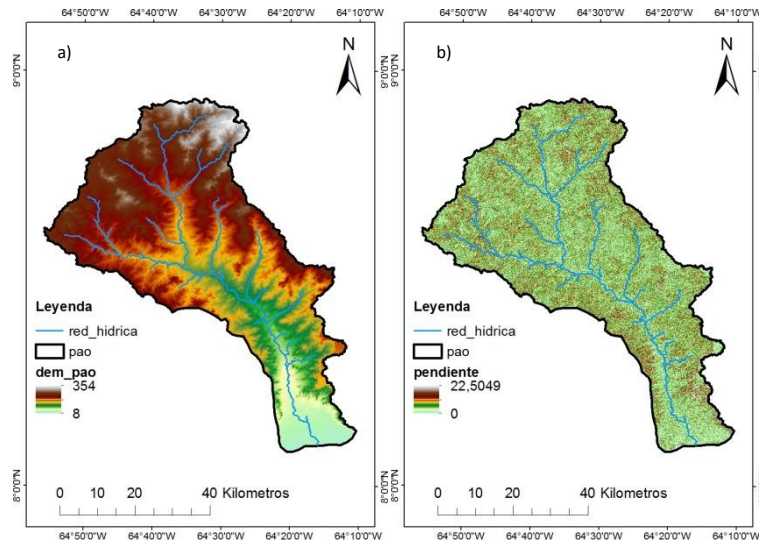


**Figura 5.39** Mapa de la cuenca del río Cuchivero. a) Mapa de Elevación b) Mapa de pendiente

La cuenca del río Cuchivero tiene un área de 15832,05 km<sup>2</sup>. Con un perímetro de 793,46 km y una longitud promedio de 203 km. Y su longitud del cauce principal es de 312,794 km. Posee valores de elevación media de 347,88 ± 297,18 m, y como se puede observar el Figura 5.39 las zonas más elevadas se encuentran hacia toda la periferia de la cuenca teniendo los valores máximos hacia el sureste de la cuenca con 2080 m y disminuyendo en las zonas centrales alcanzando los valores mínimos hacia la zona norte con 0 m. Con una pendiente en sus zonas mínimas de 0° y en sus máximos logra alcanzar los 81,78°; sus valores de pendiente media son de 10,24° ± 8,84°. (Ver Tabla 5.5)

**Tabla 5.6** Atributos primarios calculados para la cuenca del río Pao

Área (km <sup>2</sup> )		Longitud cuenca (km)			Longitud cauce (km)		Perímetro (km)	
3201,61		104,19			154,35		357,61	
Elevación (m)				Pendiente (°)				
Min	max	media	SD	min	max	media	SD	
8	354	168,89	65,28	0	22,50	2,76	1,78	

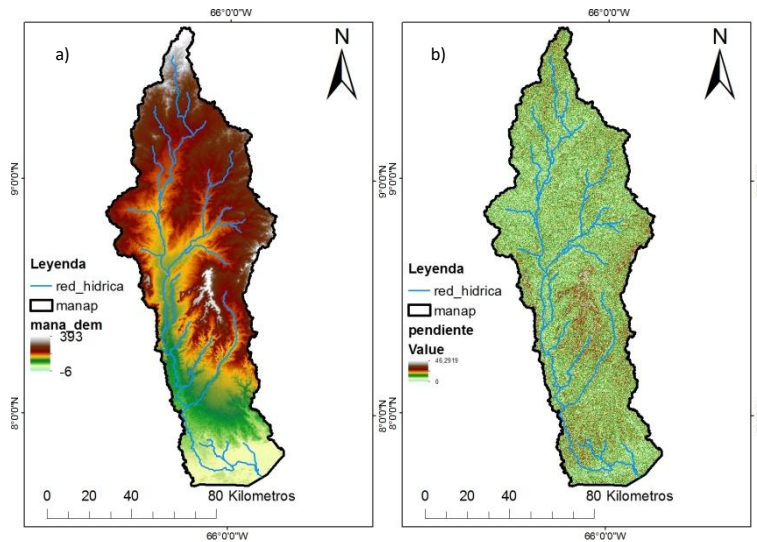


**Figura 5.40** Mapa de la cuenca del río Pao. a) Mapa de Elevación b) Mapa de pendiente

La cuenca del río Pao posee una área de 3201,61 km<sup>2</sup>, por lo que es considerada una cuenca de extensión grande, siendo esta la de menor extensión entre las cuencas estudiadas. Un perímetro de 357,61 km y una longitud de 104,19 km. Mientras que la longitud del cauce principal alcanza los valores de 154,35. Presenta valores de elevación media de 168,89 ± 65,28 m; y se puede observar en la Figura 5.40 que alcanza los valores máximos de elevación hacia el norte de la cuenca hasta 354 m, y valores decrecientes hacia el sur en la desembocadura del río con valores de 8 m. con valores de pendiente media de 2,76 ± 1,78°, alcanzando en algunas zonas pendiente máximas de 22,50° que representan sus zonas más accidentadas y pendientes mínimas de 0°. (Ver Tabla 5.6)

**Tabla 5.7** Atributos primarios calculados para la cuenca del río Manapire

Área (km <sup>2</sup> )		Longitud cuenca (km)				Longitud cauce (km)		Perímetro (km)	
9549,62		218,46				327,95		983,23	
Elevación (m)				Pendiente (°)					
Min	max	media	SD	min	max	media		SD	
-6	393	120,43	41,80	0	46,29	2,55		1,73	



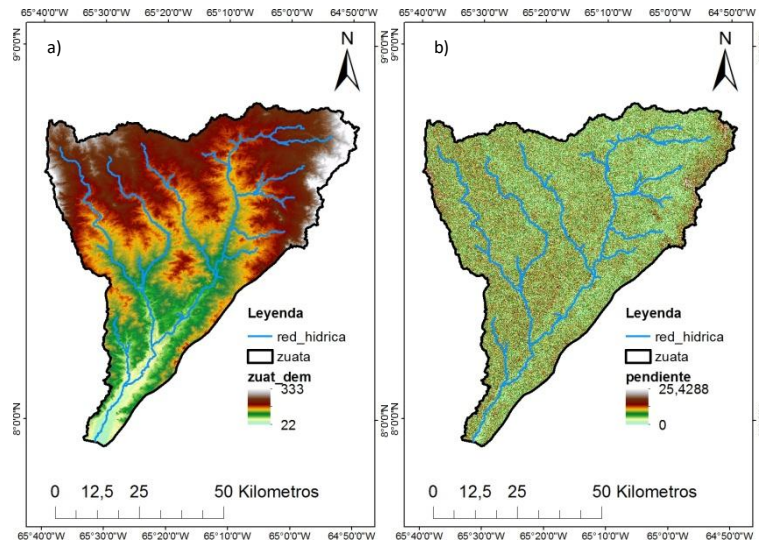
**Figura 5.41** Mapa de la cuenca del río Manapire. a) Mapa de Elevación b) Mapa de pendiente

La cuenca del río Manapire presenta una área de 9549,62 km<sup>2</sup>, lo que la clasifica como una cuenca con una extensión muy grande. Un perímetro de 683,23 km, una longitud promedio de 218,46 km y una longitud del cauce de 327,95km. Tiene elevaciones medias promedios que alcanzan los valores de 120,43 ± 41,80 m con elevaciones máximas que alcanzan los 393 m hacia el norte de la cuenca y como se puede observar en la Figura 5.41 va disminuyendo hacia la desembocadura con valores mínimos de -6 m hacia el sur de la cuenca. Sus pendientes medias son solo de 2,55 ± 1,73°. Con valores de pendiente máxima en algunas zonas de 46,29 y de pendiente mini de 0°. (Ver Tabla 5.7)

**Tabla 5.8** Atributos primarios calculados para la cuenca del río Zuata

Área (km <sup>2</sup> )		Longitud cuenca (km)			Longitud cauce (km)		Perímetro (km)	
4622,01		122,06			172,10		392,91	
Elevación (m)				Pendiente (°)				
Min	max	media	SD	min	max	media	SD	
22	333	120,68	38,14	0	25,42	2,63	1,57	





**Figura 5.42** Mapa de la cuenca del río Zuata. a) Mapa de Elevación b) Mapa de pendiente

El área de la cuenca del río Zuata presenta valores de 4622,01 km<sup>2</sup> por lo cual es considerada una cuenca muy grande. Con un perímetro de 392,91 km y una longitud de 122,06 km. Mientras que la longitud del cauce principal es 172,10 km. Presenta elevaciones medias promedio de  $120,68 \pm 38,14$  m con valores mínimos hacia la desembocadura del río al sur de la cuenca con valores de 22 m y como se puede observar en la Figura 5.42 alcanza sus valores máximos hacia el norte de la cuenca de hasta 333 m. Con una pendiente promedio de  $2,63 \pm 1,57^\circ$ , presentando las pendientes medias más baja de las cuencas estudiadas, con algunas zonas fuertemente accidentadas que logran alcanzar los 25,42°. (Ver Tabla 5.8)

#### 5.4.1.1 Otros Aspectos Morfométricos de la cuenca

**Tabla 5.9** Valores Morfométricos de la cuenca Aro

Cuenca	Forma		Relieve	Drenaje
	Kc	Kf	Km	
Aro	2,375	0,342	0,015	Dendrítico

Estos valores dejan en evidencia algunos aspectos importantes de la cuenca, el gradiente de compacidad (Kc) de 2,375 lo que indica que esta cuenca es rectangular oblonga a casi rectangular (alargada) debido a su lejanía al valor de 1, lo cual también supone que esta cuenca es de menor peligrosidad durante las crecidas que serán menores, porque las distancias relativas de los puntos de la divisoria con respecto a uno central, representan diferencias mayores y el tiempo de concentración es mayor, por lo tanto menor será la posibilidad de que las ondas de crecidas sean continuas. Tiene un valor de factor de

forma (Kf) de 0,342 lo cual indica que la misma es moderadamente achatada, y tiene valores de índice de masividad (Km) de 0,015 lo cual es indicativo de que es una zona muy montañosa. Lo cual es también evidenciado en el MED el cual muestra claramente como la cuenca es mayormente montañosa. (Ver Tabla 5.9)

**Tabla 5.10** Valores Morfométricos de la cuenca Caura

Cuenca	Forma		Relieve	Drenaje
	Kc	Kf	Km	
Caura	2,203	0,331	0,009	Dendrítico

La cuenca del río Caura presenta valores de Kf de 0,331, lo cual sugiera que la cuenca es ligeramente achatada, valores de Km de 0,009 lo cual indica que es una zona muy montañosa, y puede ser evidenciado con los valores altos de elevación, Y valores de Kc de 2,203 lo cual se puede asumir como consecuencia de que es una cuenca rectangular oblonga a casi rectangular (alargada), esta tienen mucho menor tendencia a concentrar fuertes volúmenes de agua de escurrimiento. (Ver Tabla 5.10)

**Tabla 5.11** Valores Morfométricos de la cuenca Cuchivero

Cuenca	Forma		Relieve	Drenaje
	Kc	Kf	Km	
Cuchivero	1,768	0,384	0,022	Dendrítico

La cuenca del río Cuchivero tiene valores de Kc de 1,768 lo cual es indicativo de que es una cuenca rectangular oblonga a casi rectangular es decir; alargada, con menor tendencia a crecidas grandes, tiene valores de Kf de 0,384 lo cual sugiere que es una cuenca moderadamente achatada, y valores de Km de 0,022 lo cual es indicativo de ser una zona muy montañosa. (Ver Tabla 5.11)

**Tabla 5.12** Valores Morfométricos de la cuenca Pao

Cuenca	Forma		Relieve	Drenaje
	Kc	Kf	Km	
Pao	1,769	0,295	0,053	Dendrítico

La cuenca del río Pao tiene valores de Kc de 1,769 lo cual es indicativo de ser una cuenca rectangular oblonga a casi rectangular (alargada), con menor peligrosidad a tener crecidas mayores y continuas, posee valores de Kf de 0,295 lo cual es indicativo de ser una cuenca ligeramente achatada y con valores de Km de 0,053 lo que sugiere que es una cuenca muy montañosa. (Ver Tabla 5.12)

**Tabla 5.13** Valores Morfométricos de la cuenca Manapire

Cuenca	Forma		Relieve	Drenaje
	Kc	Kf	Km	
Manapire	1,958	0,2	0,013	Dendrítico

La cuenca del río Manapire presenta valores de Kc de 1,958, lo cual es indicativo de ser una cuenca rectangular oblonga a casi rectangular, es decir; alargada. Esta cuenca es la que menor peligrosidad de crecidas mayores, debido a que la tendencia de a concentrar fuertes volúmenes de aguas es menor. Tiene valores de Kf de 0,2 lo cual sugiere que es una cuenca ligeramente achatada y valores de Km de 0,013 lo que indica ser una cuenca muy montañosa. (Ver Tabla 5.13)

**Tabla 5.14** Valores Morfométricos de la cuenca Zuata

Cuenca	Forma		Relieve	Drenaje
	Kc	Kf	Km	
Zuata	1,618	0,310	0,026	Dendrítico

Esta cuenca posee valores de Kc de 1,618, lo cual sugiere que la misma es una cuenca oval oblonga a casi rectangular oblonga, con muy poca tendencia a concentrar fuertes volúmenes de aguas lo cual es reflejado por su lejanía del valor 1. Presenta valores de Kf de 0,310 lo que sugiere ser una cuenca ligeramente achatada y valores de Km de 0,010 lo cual es indicativo de ser muy montañosa. (Ver Tabla 5.14)

#### 5.4.2 Atributos Secundarios

Entre los atributos secundarios calculados aquí tenemos el índice de humedad, el índice de potencia de flujo, el índice de capacidad de transporte de sedimentos y el índice topográfico compuesto. A continuación se muestran los resultados obtenidos y los mapas de cada uno de ellos.

Los resultados obtenidos de los atributos secundarios resultan de vital importancia para el estudio de los procesos que intervienen en los cambios del relieve. Entre los atributos calculados se tienen: 1) el Índice de humedad (WI) que proporciona una idea de los puntos más bajos de la cuenca los cuales coincidirán con las zonas de máxima humedad a las afueras de los canales, indicando la distribución y origen del escurrimiento superficial y de las zonas potenciales de saturación. 2) El índice de potencia de flujo (SPI) que proporciona una estimación de la potencia erosiva de la corriente, infiriendo las zonas de aceleración o disminución del flujo. 3) El índice de capacidad de transporte (STI) que proporciona una estimación de la potencia topográfica para la erosión o la sedimentación. 4) El índice topográfico compuesto que es una variación del potencial de flujo que permitirá ubicar las cabeceras de los ríos de primer orden.

El mapa de índice de humedad (WI) del río Aro presenta los mayores valores de humedad en las zonas de los canales, y aunque la zona montañosa no se puede tomar como un punto bajo, entre las montañas existen zonas que representan los puntos más bajos de la cuenca por lo tanto pueden presentar valores de humedad máximos, como se puede observar en la Figura 5.43 estas zonas están ubicadas en la cabeceras del río así como también algunos puntos menores en cantidad y tamaño en la zona NE. Alcanzan valores máximos de humedad de 21,476. La mayor parte de la cuenca presenta valores promedio de humedad de  $8,146 \pm 1,838$

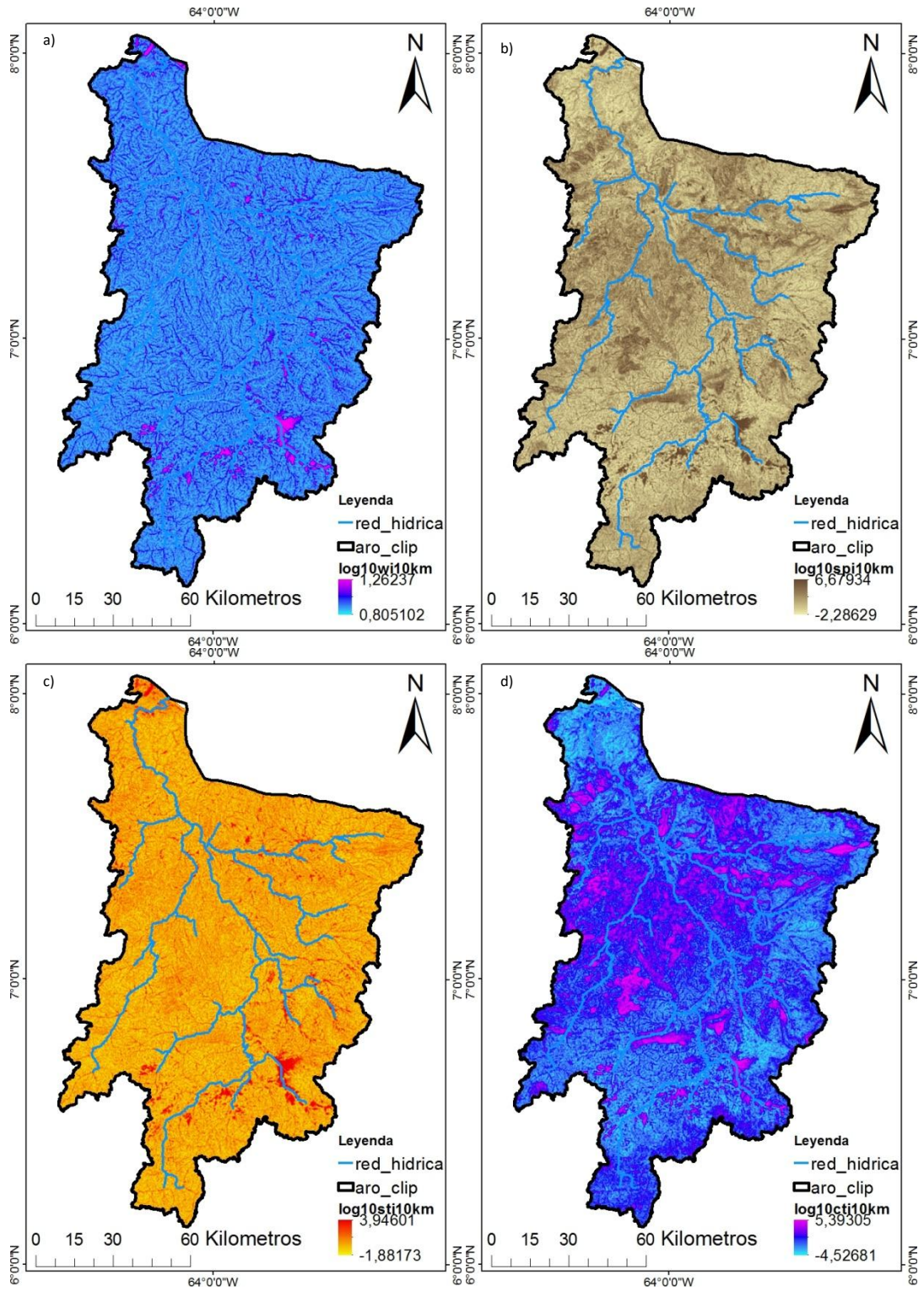
Los valores máximos en el mapa de índice de potencia de flujo (SPI) del río Aro están representados en la mayor parte de la cuenca, como se puede observar en la Figura 5.43 existen muchos puntos máximos de potencia erosiva de la corriente por cual se considera que esta cuenca tiene una gran capacidad erosiva. El mayor valor es  $6,629E+09$

El mapa de índice de capacidad de transporte (STI) por su parte presenta en su mayoría valores promedios alrededor de la cuenca como se observa en la Figura 5.43, presentando solo valores máximos en los canales fluviales y algunas zonas de la parte central de la cuenca. Estos valores máximos alcanzan los  $1,152E+05$ .

Por su parte el mapa de índice topográfico compuesto (CTI) como se puede observar en la Figura 5.43 presenta sus valores máximos alrededor de todas las cabeceras de los arroyos de primer orden de la cuenca. Por lo tanto se puede inferir que por la gran cantidad de puntos máximos hay muchos arroyos de primer orden en la misma. Los valores máximos alcanzan los  $2,246E+09$  (Ver Tabla 5.15)

**Tabla 5.15** atributos secundario del río Caura. Índice de Humedad (WI) índice de potencia de flujo (SPI) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) índice topográfico compuesto (CTI)

<b>Aro</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Med</b>	<b>DS</b>
<b>WI</b>	5,856	21,476	8,146	1,838
<b>SPI</b>	0	6,629E+09	2,91E+05	1,512E+07
<b>STI</b>	0	1,152E+05	281,56	1622,38
<b>CTI</b>	0	2,426E+09	2,932E+04	2,225E+06



**Figura 5.43** Atributos secundarios río Aro a) Índice de Humedad (WI) b) índice de potencia de flujo (SPI) c) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) d) índice topográfico compuesto (CTI)

El mapa de WI en el río Caura presenta en su mayoría valores promedios, en la Figura 5.44 se muestra solo en la zona de la cabecera del río y en las zonas de los valles de los ríos se puede observar valores máximos, estos valores promedios rondan los  $10,424 \pm 10,424$ .

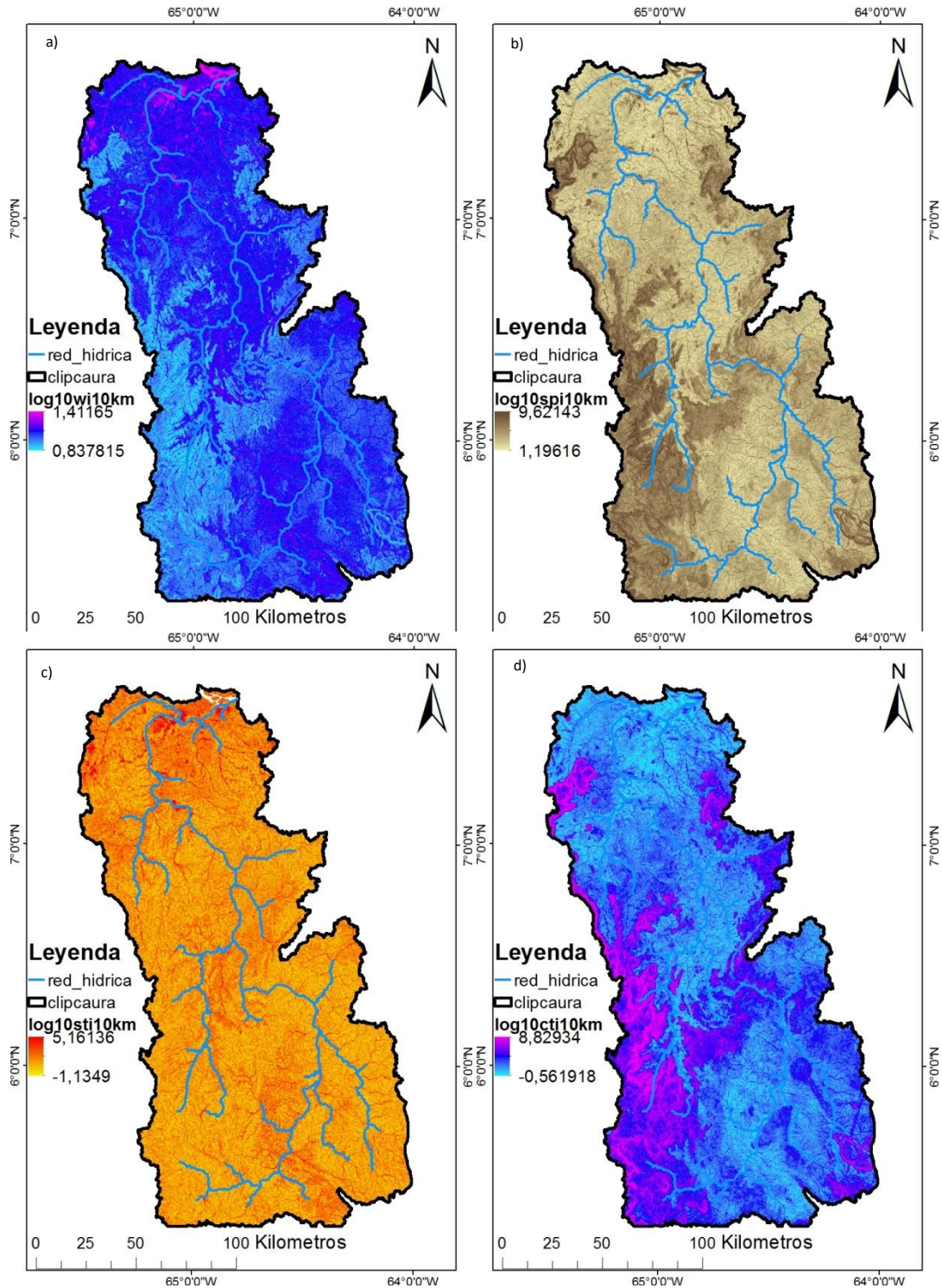
Por su parte si se observa la Figura 5.44 el mapa de SPI presenta en su mayoría valores máximos que van rodeando la periferia de la cuenca, es decir hacia las zonas montañosas de la misma, y algunos zonas centrales, básicamente esta es una cuenca con gran potencial erosivo donde la mayor aceleración del flujo esta hacia la periferia de la cuenca, los máximos valores de SPI alcanzan  $1,120E+10$ .

Mientras que el mapa de STI muestra en la Figura 5.44 que sus valores máximos están hacia la zona central de la cuenca circundando los canales fluviales de la cuenca, estos valores máximos pueden alcanzar los  $1,463E+05$ , mientras que sus valores medios se encuentran hacia la periferia disminuyendo la capacidad de transporte hacia la misma.

El mapa de CTI debido a que es una variación del SPI se pueden observar en la Figura 5.44 algunas similitudes entre ambos, entre ellas tenemos que los valores máximos del CTI coinciden en las mismas zonas que los valores máximos del SPI, que son las zonas de mayor potencial erosivo, estas zonas logran llegar a los  $9,875E+09$ . (Ver Tabla 5.16)

**Tabla 5.16** atributos secundario del río Caura. Índice de Humedad (WI) índice de potencia de flujo (SPI) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) índice topográfico compuesto (CTI)

<b>Caura</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Med</b>	<b>DS</b>
<b>WI</b>	5,108	28,026	10,424	2,076
<b>SPI</b>	15,709	$1,120E+10$	$7,033E+05$	$4,810E+07$
<b>STI</b>	0	$1,463E+05$	297,081	1501,979
<b>CTI</b>	0,274	$9,875E+09$	$1,4725E+05$	$1,373E+07$



**Figura 5.44** Atributos secundarios río Cauca a) Índice de Humedad (WI) b) índice de potencia de flujo (SPI) c) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) d) índice topográfico compuesto (CTI)

Para el río Cuchivero el mapa de WI presenta los máximos valores hacia las zonas de menor elevación como lo es hacia el norte de la cuenca y la zona de canales fluviales de la misma. Mientras que los valores van disminuyendo hacia el sur donde presenta valores promedio mayormente que rodean los valores de  $9,316 \pm 2,766$ .

Mientras que sus valores máximos en el mapa de SPI abarcan la mayor parte de la cuenca los que permite decir que la misma es de gran potencial erosivo especialmente en las zonas montañosas de la misma. Alcanzando los máximos de  $7,352E+09$ .

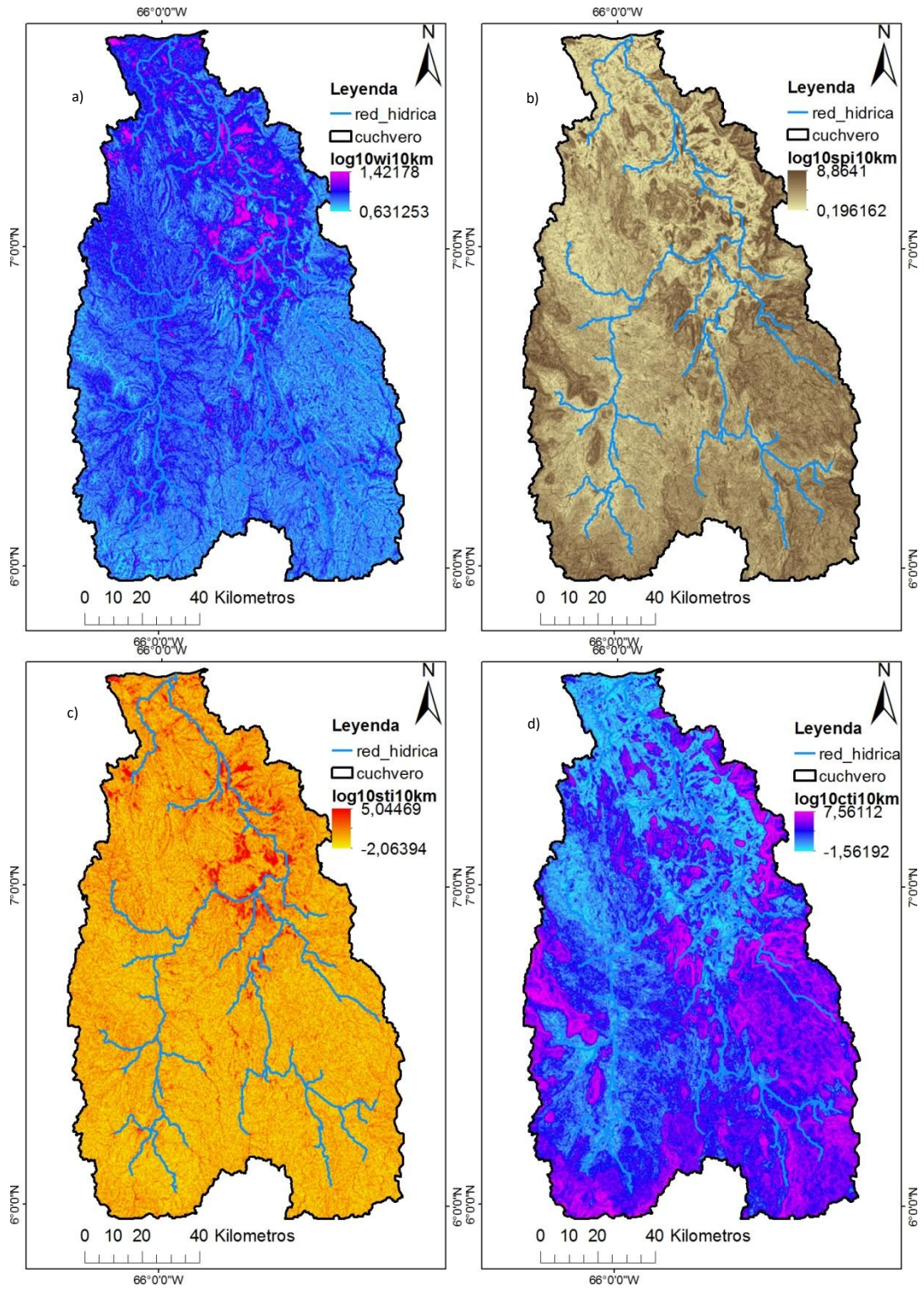
Para el mapa de STI presenta valores máximos hacia la zona central envolviendo el sistema de drenaje fluvial de la cuenca, estos alcanzan los  $1,164E+05$ , mientras que los valores van disminuyendo hacia la periferia de la cuenca donde mayormente presenta valores medios.

En el mapa de CTI se puede observar como la misma presenta valores máximos alrededor de toda la cuenca, si se deseara enmarcar una zona en particular se puede decir que están más concentrados hacia la periferia donde se encuentran las cabeceras de los ríos de primer orden de la cuenca. Los valores máximos alcanzados son de  $3,904E+09$ . (Ver Tabla 5.17 y Figura 5.45)

**Tabla 5.17** atributos secundario del río Cuchivero. Índice de Humedad (WI) índice de potencia de flujo (SPI) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) índice topográfico compuesto (CTI)

<b>Cuchivero</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Med</b>	<b>DS</b>
<b>WI</b>	2,956	27,458	9,316	2,766
<b>SPI</b>	1,570	$7,352E+09$	$4,429E+05$	$2,508E+07$
<b>STI</b>	0	$1,164E+05$	306,365	1861,008
<b>CTI</b>	0,027	$3,904E+09$	$6,551E+04$	$6,669E+06$





**Figura 5.45** Atributos secundarios río Cuchivero a) Índice de Humedad (WI) b) índice de potencia de flujo (SPI) c) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) d) índice topográfico compuesto (CTI)

Para la cuenca del río Pao el mapa de WI presenta en su mayor parte valores promedio de humedad que llegan a los  $10,266 \pm 2,784$ , en la Figura 5.46 se muestra que los máximos son solo alcanzados en algunas zonas muy pequeñas de la cuenca, básicamente envolviendo la zona de los canales fluviales.

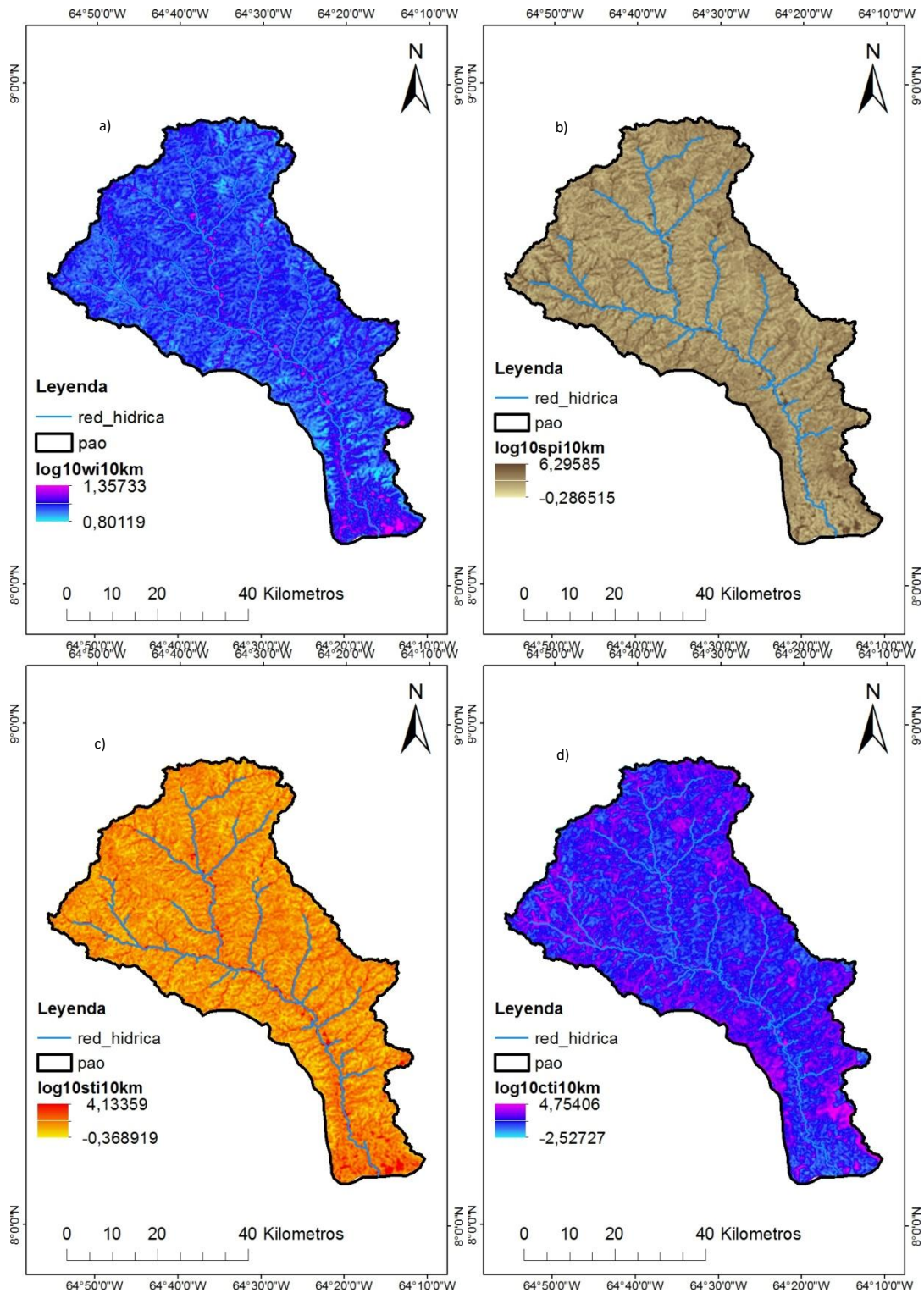
Mientras que los valores de máximos de SPI en el mapa de la Figura 5.46 se muestran en la línea periférica de la cuenca y la zona de los valles de los ríos, básicamente la cuenca presenta valores promedios que rodean los  $7,407E+04 \pm 2,490E+06$ .

Para el mapa de STI los valores máximos se concentran en la zona central rodeando los sistemas de drenaje de la cuenca, estos valores llegan a alcanzar los 60113,367, y si se observa la Figura 5.46 tiene valores promedios en su mayoría que disminuyen potencialmente hacia la periferia de la cuenca.

Claramente se puede observar en la Figura 5.46 en el mapa de CTI los valores máximos alrededor de toda la cuenca que representan las cabeceras de los arroyos de primer orden que se encuentran en la misma. Estos valores máximos llegan a los  $5,307E+07$  que por su parte va disminuyendo hasta alcanzar los mínimos en la parte central de la cuenca. (Ver Tabla 5.18)

**Tabla 5.18** atributos secundario del río Pao. Índice de Humedad (WI) índice de potencia de flujo (SPI) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) índice topográfico compuesto (CTI)

<b>Pao</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Med</b>	<b>DS</b>
<b>WI</b>	5,430	26,922	10,266	2,784
<b>SPI</b>	0	3,419E+08	7,407E+04	2,490E+06
<b>STI</b>	0	60113,367	307,621	1504,154
<b>CTI</b>	0	5,307E+07	3,492E+03	1,532E+05



**Figura 5.46** Atributos secundarios río Pao a) Índice de Humedad (WI) b) índice de potencia de flujo (SPI) c) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) d) índice topográfico compuesto (CTI)

En esta cuenca del río Manapire los valores de humedad mayormente representados en el mapa de WI son predominantemente medios, que rodean los  $10,411 \pm 2,829$ , mientras que los valores máximos son solo alcanzados en algunas zonas muy pequeñas: la desembocadura de la cuenca y los valles de los ríos.

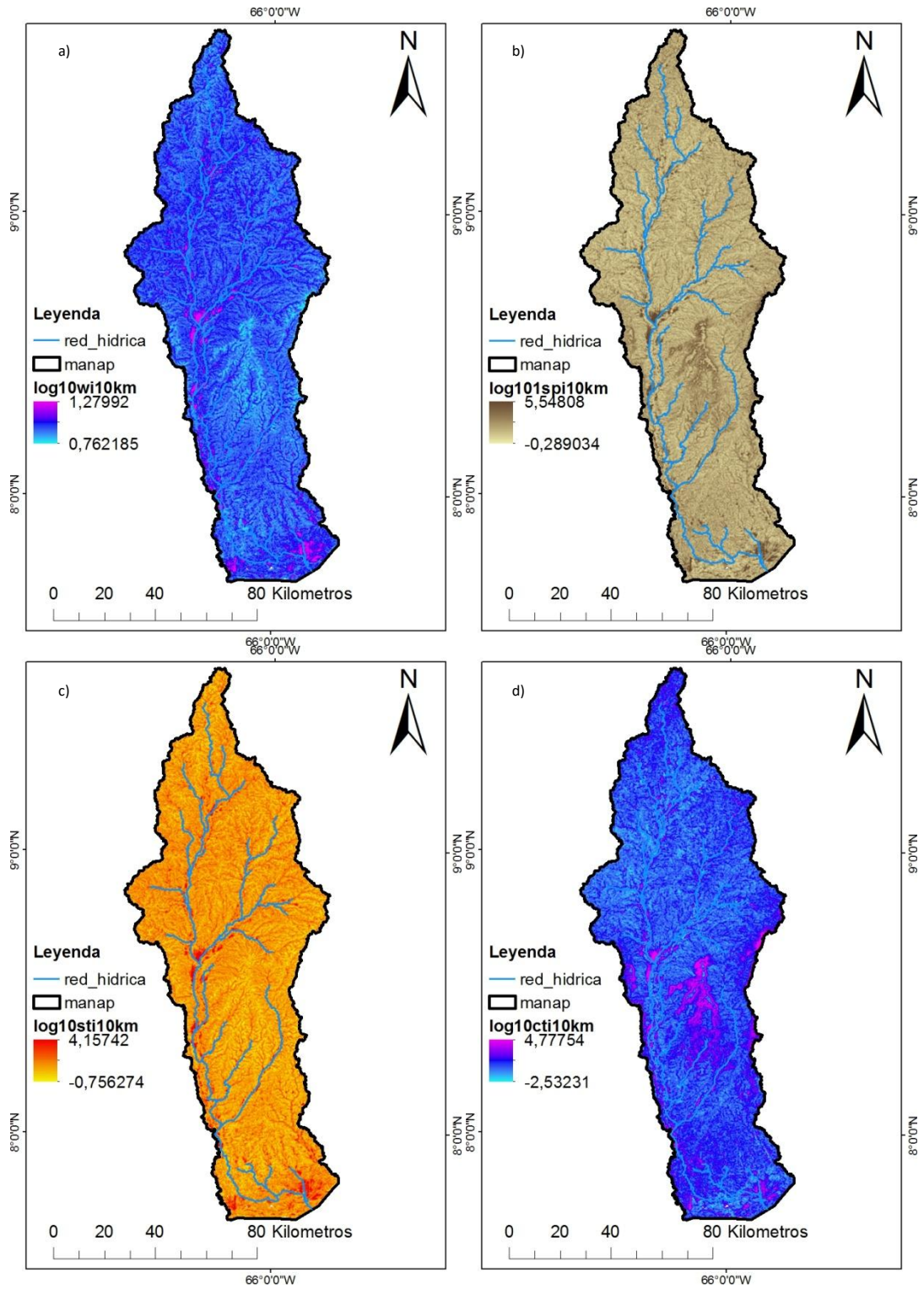
En el mapa de SPI se puede observar como los máximos valores están en el sistema de drenaje y la línea periférica de la cuenca, así como una pequeña parte de la zona media de la cuenca que tiene alto potencial erosivo, pero la mayor parte de la cuenca representa valores medios a bajo que rodean los  $1,681E+05 \pm 7,12E+06$ .

En el mapa de STI por su parte se puede observar como los valores máximos solo se encuentran envolviendo la zona de los canales fluviales principales de la cuenca, pero la mayor parte de la cuenca presenta valores medios que llegan a alcanzar los  $325,11 \pm 1804,32$ .

A diferencia de las otras cuenca el mapa de CTI en esta cuenca presenta muy pocas zonas con valores máximos de CTI, lo se puede inferir con menor cantidad de cabeceras de arroyos de primer orden, estos máximos solo se ubican en una pequeña zona en la parte central media de la cuenca, que llega a los  $4,779E+08$ . (Ver Tabla 5.19 y Figura 5.47)

**Tabla 5.19** atributos secundario del río Manapire. Índice de Humedad (WI) índice de potencia de flujo (SPI) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) índice topográfico compuesto (CTI)

<b>Manapire</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Med</b>	<b>DS</b>
<b>WI</b>	4,455	28,003	10,411	2,829
<b>SPI</b>	0	1,859E+09	1,681E+05	7,12E+06
<b>STI</b>	0	92499,7	325,11	1804,32
<b>CTI</b>	0	4,779E+08	9,561E+03	6,433E+05



**Figura 5.47** Atributos secundarios río Manapire a) Índice de Humedad (WI) b) índice de potencia de flujo (SPI) c) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) d) índice topográfico compuesto (CTI)

Para la cuenca del río Zuata el mapa de índice de humedad mostrado en la Figura 5.48 representa en su mayoría valores medios, que alcanzan los  $10,283 \pm 2,805$ . Sus valores máximos son alcanzados básicamente en la zona de canales fluviales de la cuenca.

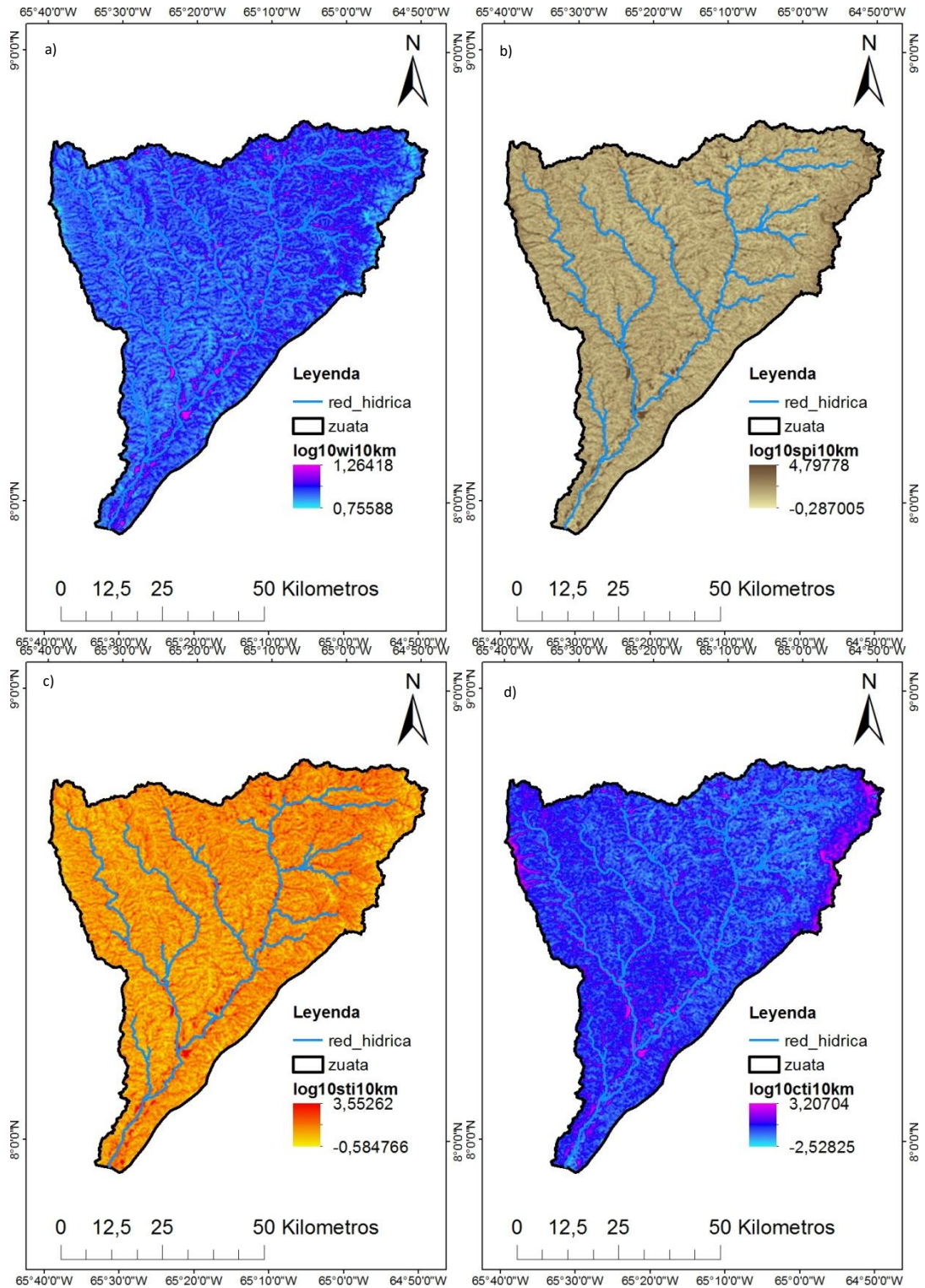
De igual manera podemos decir básicamente lo mismo para el mapa de SPI donde sus valores máximos solo envuelven el sistema de drenaje de la cuenca y debido a que en esta zona es que están los valores máximos, esto representan que en esta zona está ubicado el mayor potencial erosivo de la cuenca. En la Figura 5.48 se puede observar que este potencial erosivo va disminuyendo hacia la periferia de la cuenca donde presenta los mínimos.

Para el mapa de STI de la Figura 5.48 los valores máximos están mayormente representados en toda la cuenca, viéndose más concentrados hacia el este, es decir rodeando los sistemas de valles de los ríos. Los valores máximos alcanzan los 71037,505.

Mientras que para el mapa de CTI también tienen predominancia los valores promedios que llegan a los  $5,412E+03 \pm 2,588E+05$ , mientras que sus máximos solo se pueden observar al oeste y este en la periferia de la cuenca, así como también en una pequeña parte de la parte central media de la cuenca. (Ver Tabla 5.20 y Figura 5.48)

**Tabla 5.20** atributos secundario del río Zuata. Índice de Humedad (WI) índice de potencia de flujo (SPI) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) índice topográfico compuesto (CTI)

<b>Zuata</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Med</b>	<b>DS</b>
<b>WI</b>	5,317	27,341	10,283	2,805
<b>SPI</b>	0	7,053E+08	9,771E+04	3,434E+06
<b>STI</b>	0	71037,505	301,686	1499,798
<b>CTI</b>	0	1,286E+08	5,412E+03	2,588E+05



**Figura 5.48** Atributos secundarios río Zuata a) Índice de Humedad (WI) b) índice de potencia de flujo (SPI) c) índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI) d) índice topográfico compuesto (CTI)

## 5.5 ÍNDICES DE EROSIÓN CONSIDERANDO LA PRECIPITACIÓN VARIABLE

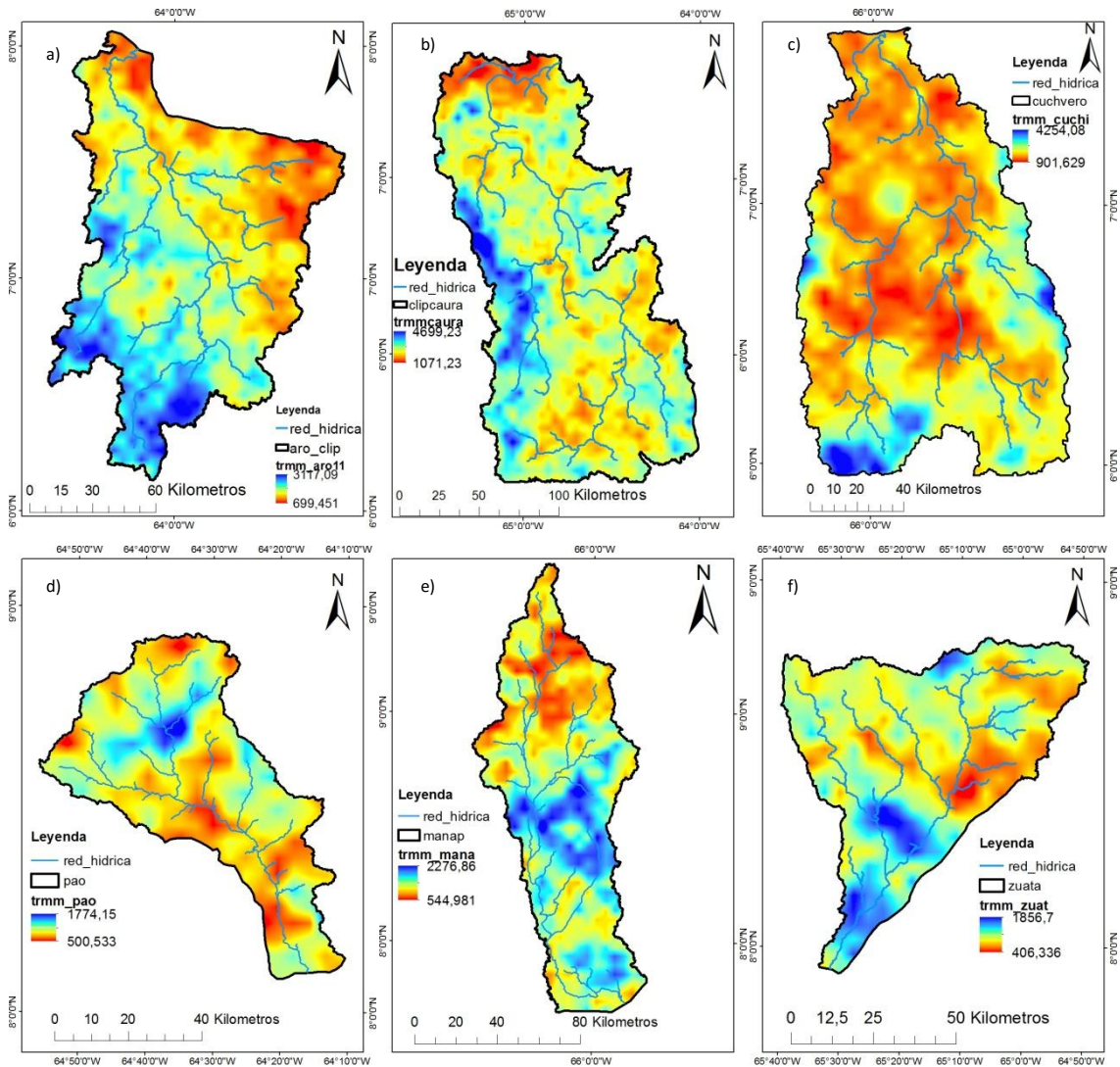
Se realizaron los índices de erosión tomando en cuenta las precipitaciones (para lo cual se utilizaron datos calibrados de la misión TRMM). Los valores presentados a continuación son los datos de índices de erosión teóricos y los índices de erosión con las precipitaciones reales. Lo cual permitirá evaluar cual es la influencia del clima en el modelado del suelo. A continuación se presentan los datos de precipitación de las cuencas ubicadas en la zona central del río Orinoco

**Tabla 5.21** Datos de precipitación TRMM año 1998 – 2009

Cuenca	Precipitación (mm/año)			
	Min	max	med	SD
<b>Aro</b>	699,45	3117,09	1789,05	454,99
<b>Caura</b>	1071,23	4699,23	2455,32	462,75
<b>Cuchivero</b>	901,63	4254,08	1913,58	537,38
<b>Pao</b>	500,53	1774,15	951,98	173,09
<b>Manapire</b>	544,98	2276,86	1256,64	537,37
<b>Zuata</b>	406,34	1856,70	1091,73	258,79

Según la Tabla 5.21 como se puede observar los datos de precipitación de las cuencas son mayores en aquellas ubicadas al sur del río Orinoco, teniendo como valor mayor la cuenca del río Caura con un valor promedio de  $24755,32 \pm 462,75$ , mientras que el menor valor de precipitaciones lo tiene la cuenca del río Pao con un valor promedio de  $951,98 \pm 173,09$ . En los mapas podemos observar en la Figura 5.49 que las zonas afectadas por las precipitaciones máximas rodean la mayor parte de todas las cuencas, infiriendo la gran influencia que tienen las precipitaciones en las características morfológicas de las cuencas





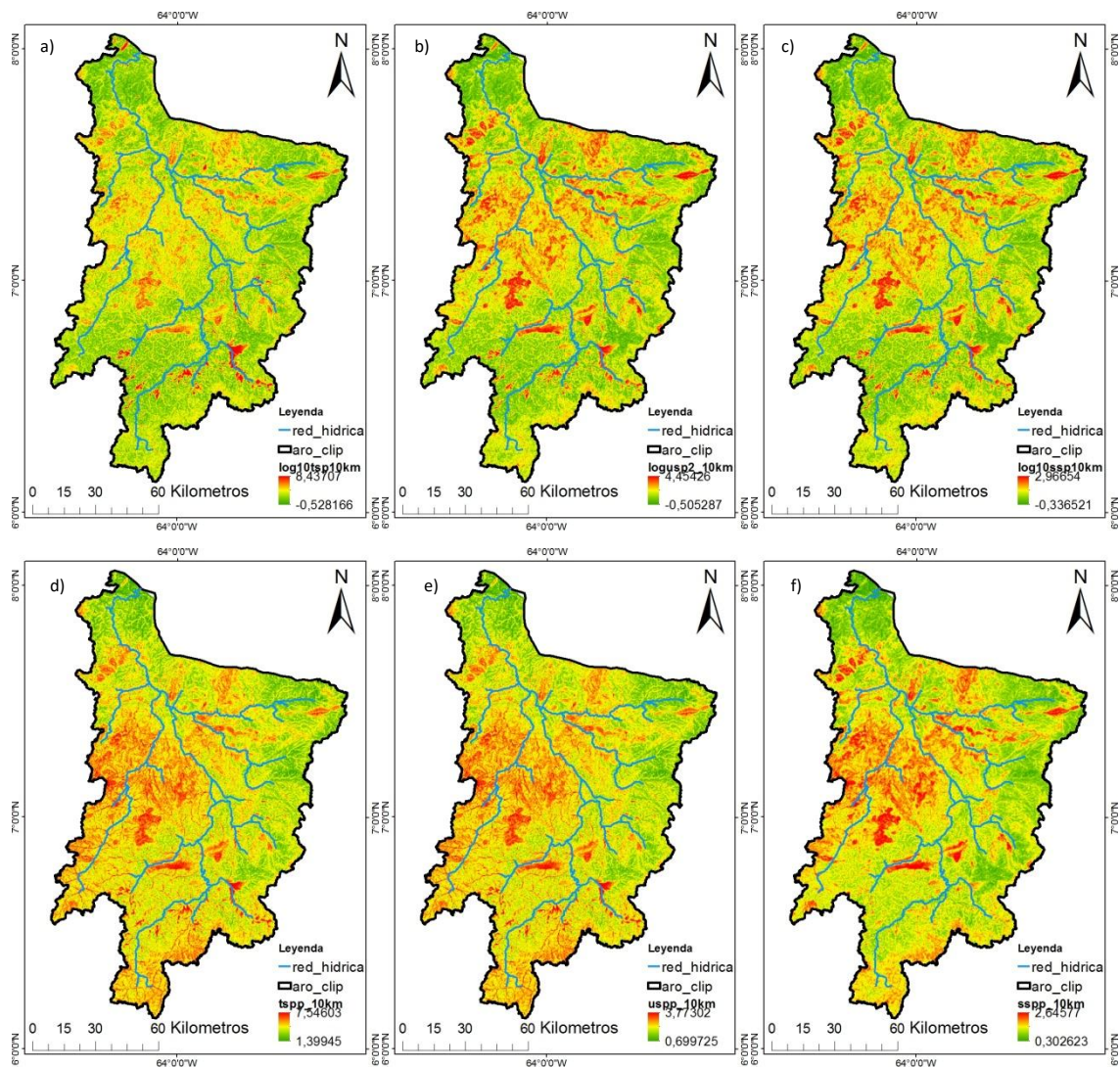
**Figura 5.49** Mapas de las precipitaciones TRMM para los años 1998 – 2009 de las cuencas de la zona central del río Orinoco (Tomado de <http://www.geog.ucsb.edu/~bodo/TRMM/>).

**Tabla 5.22** Resultados de índices de erosión del río Aro. TSP, USP, SSP.

Aro	Min	Max	Med	SD
TSP	0	3,045E+11	1,663E+07	860,469
USP	0	2,664E+06	7063,111	9718,869
SSP	0	1,903E+04	45,597	144,764
TSPP	0	4,647E+10	2,629E+06	1,341E+08
USPP	0	2,155E+05	128,72	1616,352
SSPP	0	9,364E+03	22,754	73,332

Los datos obtenidos de los índices de erosión para cuenca del río Aro difieren mayormente en su magnitud que en lo representado en el mapa. Como se puede observar el mapa de poder de flujo total (TSP) muestra como los valores máximos se encuentra alrededor de toda la cuenca, siendo el valor máximo 3,045E+11. Cuando se observa el

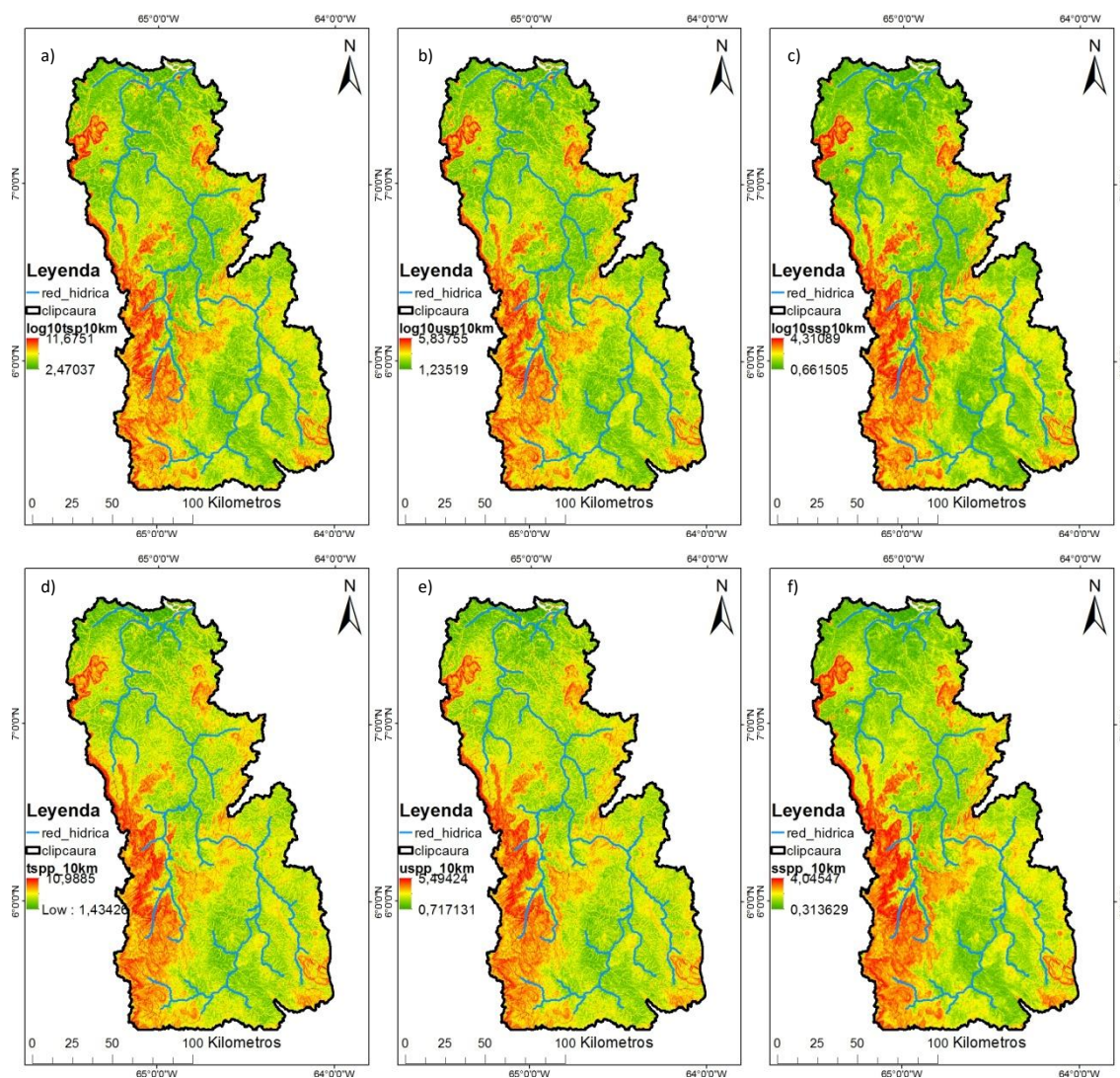
mapa de poder de flujo unitario (USP) sus valores máximos a pesar de ser mayores en magnitud que el SSP (2,664E+06), su similitud con el mismo es grande, y en el mapa que se refleja el poder de flujo de cizalla (SSP) que tiene menor magnitud (1,903E+04) que los otros dos, pero se presenta en las mismas zonas que el USP. Si se observa la Tabla 5.22 los mapas de índices de erosión con precipitaciones (TSPP, USPP, SSPP) tienen valores un 15% por debajo de los índices de erosión teóricos, en la Figura 5.50 se puede observar que estos muestran mayores zonas afectadas por la erosión máxima. Lo que representa un mayor alcance del clima en el modelado del suelo. Por otra parte como podemos notar estos presentan una similitud más acentuada entre ellos que los índices de erosión teóricos



**Figura 5.50** Mapas de índices de erosión del río Aro a) TSP b) USP c) SSP d) TSPP e) USPP f) SSPP

**Tabla 5.23** Resultados de índices de erosión del río Caura. TSP, USP, SSP

Caura	Min	Max	Med	SD
TSP	0	5,721E+11	3,305E+07	2,470E+09
USP	0	4,373E+06	1128,910	19271,519
SSP	0	2,647E+04	69,433	199,189
TSPP	0	1,198E+11	6,898E+06	5,122E+08
USPP	0	3,461E+05	172,621	2620,775
SSPP	0	1,413E+04	31,749	111,596



**Figura 5.51** Mapas de índices de erosión del río Caura a) TSP b) USP c) SSP d) TSPP e) USPP f) SSPP

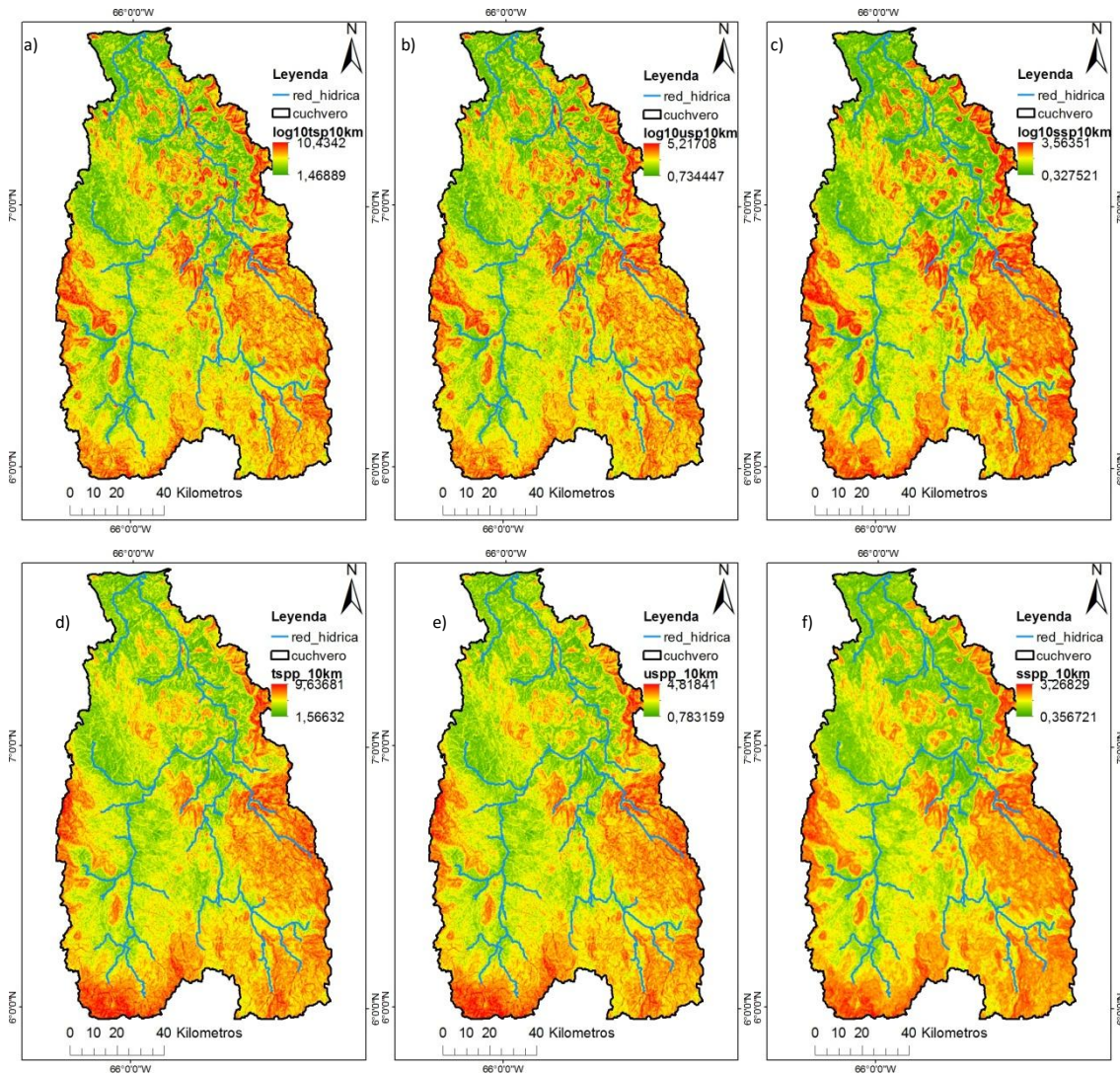
Para la cuenca del río Caura los mapas de los índices de erosión como se puede observar en el mapa tienen sus máximos en la periferia de la cuenca. Lo cual coincide con las zonas de mayor elevación, las cuales podrían ser las zonas montañosas de la cuenca. La similitud entre los atributos de los índices en cada mapa es significativa debido a que sus

máximos abarcan la misma zona. Pero si se observa la magnitud de sus valores máximos, estas difieren en cada uno, siendo el mayor el TSP con valores máximos de: 5,721E+11, mientras que los datos de USP solo alcanzan los 4,373E+06 el cual es cercano a los datos de SSP que tiene valores de 2,647E+04. Teniendo la mayor tasa de incisión entre las cuenca que están al norte de río Orinoco. Básicamente como se puede observar en la Figura 5.51 que los mapas de índices de erosión teóricos y con precipitaciones presentan similitudes muy marcadas, todos ellos abarcan gran parte de la periferia de la cuenca, a pesar de que los mapas de índices de erosión con precipitaciones tienen una disminución en sus valores del 20% estos muestran como el clima forma una parte importante en el modelado de esta zona. (Ver Tabla 5.23)

**Tabla 5.24** Resultados de índices de erosión del río Cuchivero. TSP, USP, SSP

<b>Cuchivero</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Med</b>	<b>SD</b>
<b>TSP</b>	0	3,734E+11	2034E+07	1,256E+09
<b>USP</b>	0	62485,285	24,316	354,805
<b>SSP</b>	0	21380,7	74,147	171,053
<b>TSPP</b>	0	6,015E+10	3,410E+06	2,038E+08
<b>USPP</b>	0	2,453E+05	168,255	1838,979
<b>SSPP</b>	0	1,069E+04	35,894	90,272

Al igual que la cuenca del río Caura, la cuenca del río Cuchivero muestra que los mapas de sus índices de erosión teóricos son similares unos a otros, donde sus valores rodean la periferia de la cuenca los cuales coinciden con las zonas de mayor elevación. Sus valores máximos en cambio si difieren en magnitud entre ellos. Como se puede ver en la Figura 5.52 la tasa de incisión en esta cuenca es muy grande ya que abarca la mayor parte de la cuenca sobretodo cubriendo la periferia de la misma que es donde la incisión es mayor. Siendo la cuenca con mayor riesgo potencial de erosión hídrica entre todas las aquí estudiadas. Pero por su lado los índices de erosión con precipitación muestran una disminución en los valores así como también las zonas que afectan, como podemos observar en los índices de erosión con precipitaciones los valores máximos ya no cubren todas las mismas zonas que los índices de erosión teóricos (Ver Tabla 5.24)



**Figura 5.52** Mapas de índices de erosión del río Cuchivero a) TSP b) USP c) SSP d) TSPP e) USPP f) SSPP

**Tabla 5.25** Resultados de índices de erosión del río Pao. TSP, USP, SSP

Pao	Min	Max	Med	SD
TSP	0	1,944E+10	4,239E+06	1,425E+08
USP	0	414104	360,101	3362
SSP	0	5508,02	32,005	81,284
TSPP	0	1,580E+09	3,432E+05	1,149E+07
USPP	0	3,975E+04	63,277	582,441
SSPP	0	2,226E+03	11,842	33,659

Por su parte en la cuenca del río Pao muestra valores de tasa de incisión menores que todas las cuencas al sur del río Orinoco. Si se observan la Figura 5.53 Sus mapas de índices de erosión teóricos muestran como la erosión máxima está representada en la zona circundante o del perímetro de la cuenca. Y por supuesto en la zona de los canales fluviales. Aunque sus valores máximos difieren uno del otro, sus mapas se muestran muy similares

en cuanto a las zonas donde su máxima erosión actúa. Por su parte los índices de erosión con las precipitaciones si continúan con la tendencia de disminución en cuanto a los índices de erosión teóricos. Pero sus valores máximos se observan más distribuidos y acentuados sobretodo en el índice SSPP (Ver Tabla 5.25)

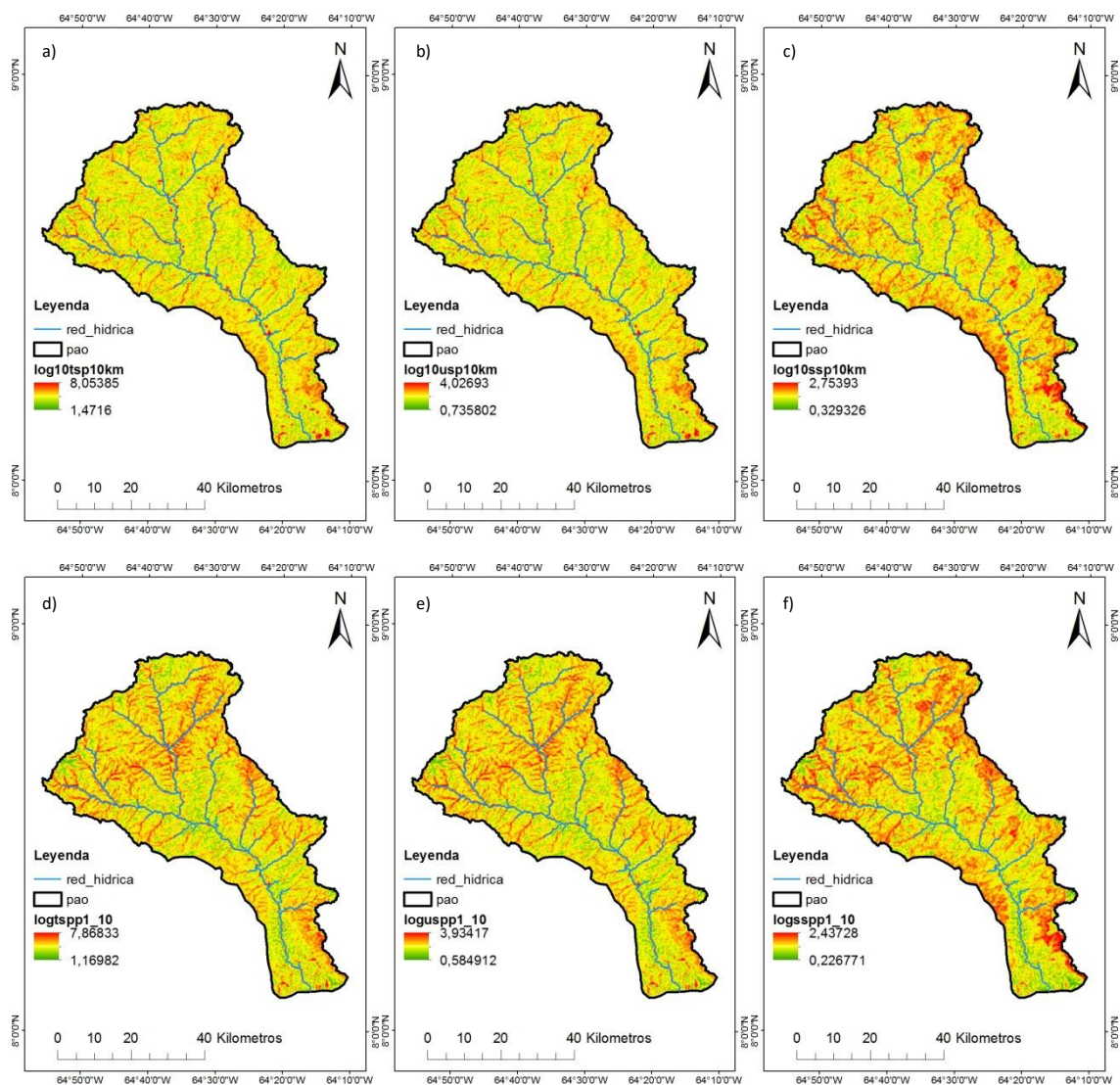
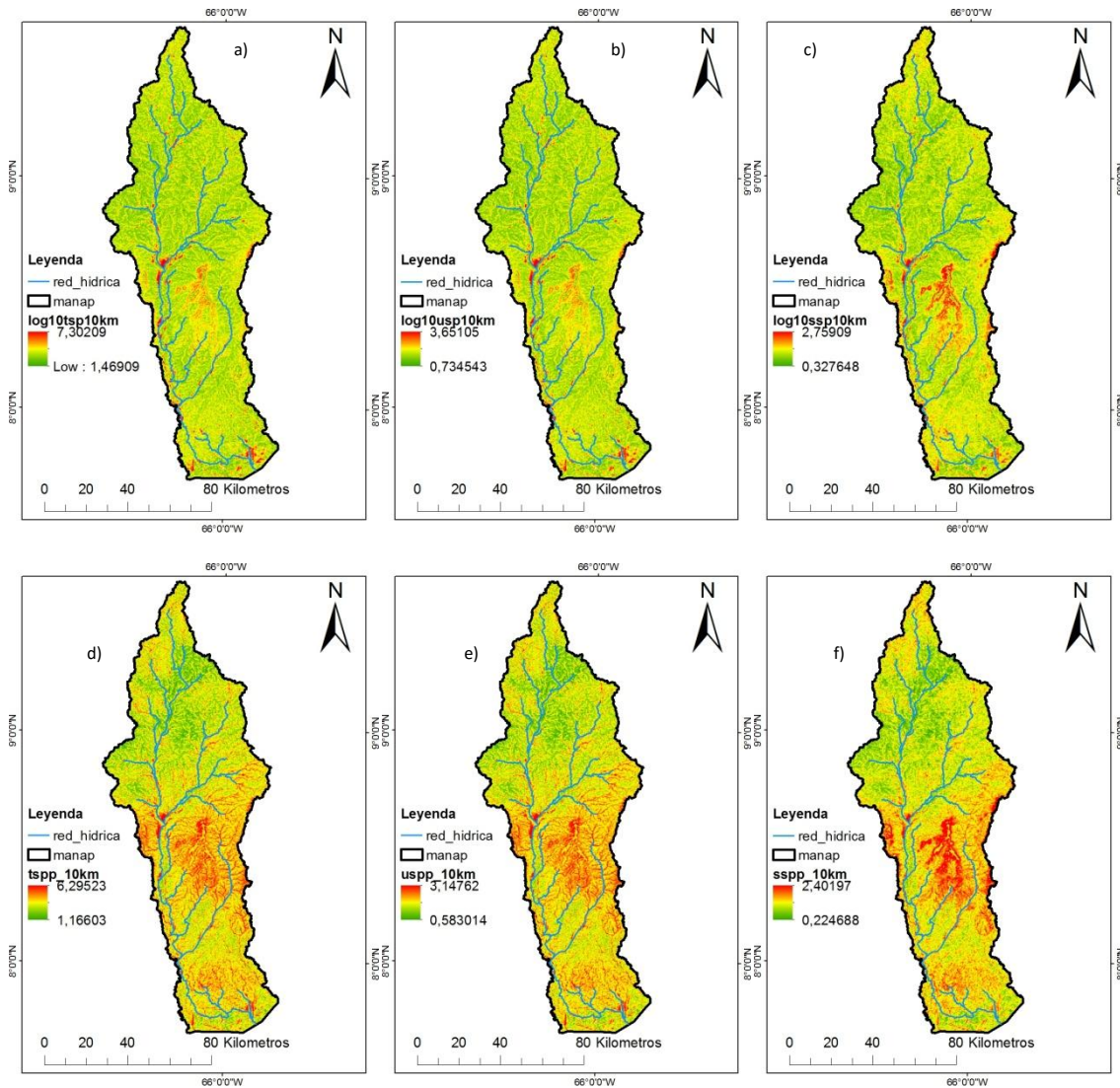


Figura 5.53 Mapas de índices de erosión del río Pao a) TSP b) USP c) SSP d) TSPP e) USPP f) SSPP

Tabla 5.26 Resultados de índices de erosión del río Manapire. TSP, USP, SSP

Manapire	Min	Max	Med	SD
TSP	0	1,043E+11	9,616E+06	4,069E+08
USP	0	1,226+06	427,183	5572,447
SSP	0	11348,691	32,709	103,768
TSPP	0	1,079E+10	7,628E+05	4,118E+07
USPP	0	1,039E+05	84,991	977,529
SSPP	0	4,935E+03	13,332	45,883

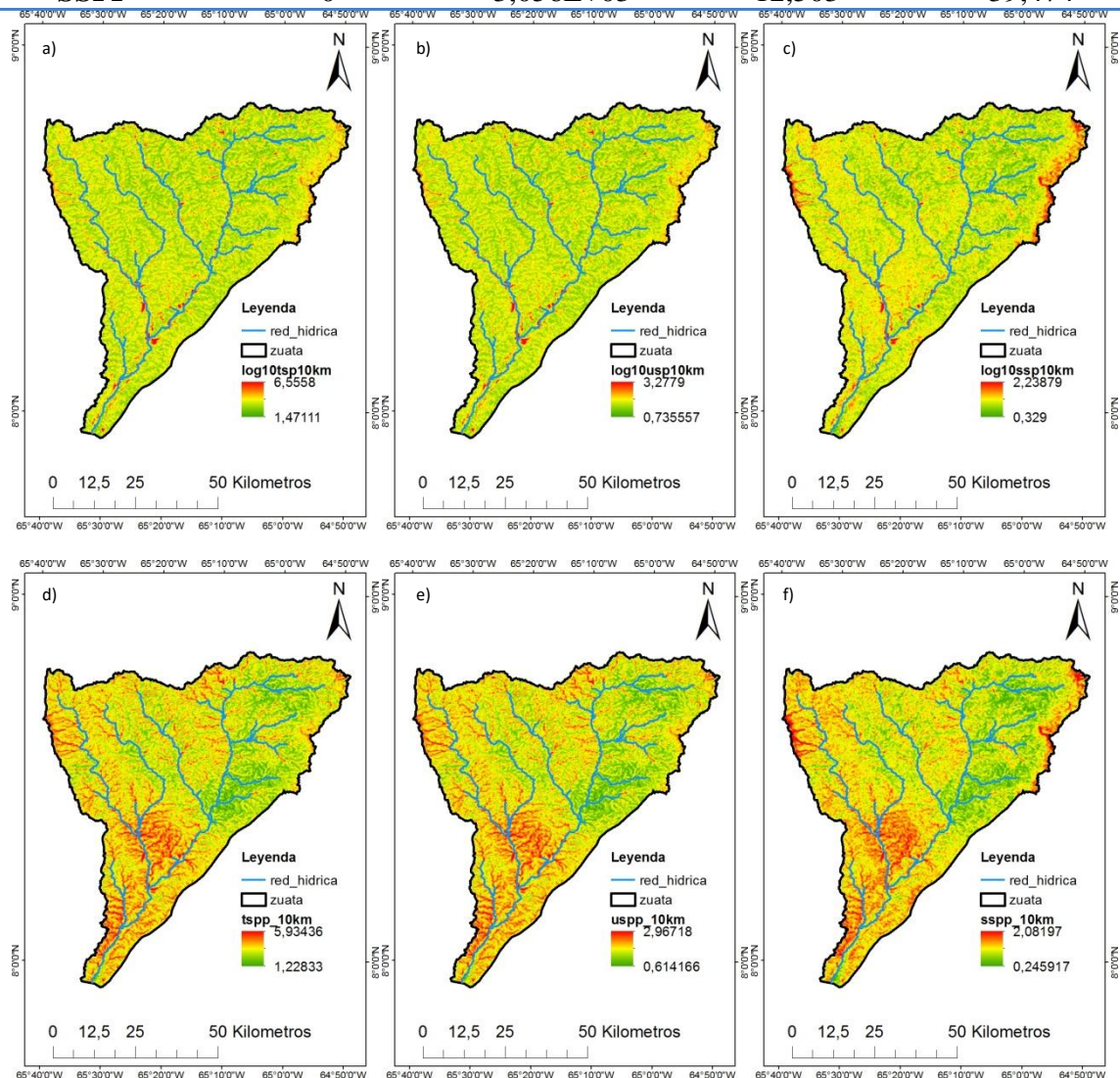


**Figura 5.54** Mapas de índices de erosión del río Manapire a) TSP b) USP c) SSP d) TSPP e) USPP f) SSPP

De todas las cuencas al sur del río Orinoco la de mayor tasa de incisión es la cuenca del río Manapire, en esta aunque el mapa no muestra muchas zonas que abarquen sus valores máximo, estos son mayores. Básicamente se puede decir que la cuenca esta básicamente enmarcada por valores promedio de incisión en su totalidad, ya que solo algunas zonas alcanzan estos altos valores de tasa de incisión teóricos. Por su parte los mapas realizados con la precipitación muestran en la Figura 5.54 valores máximos alrededor en mayores zonas que los mapas de erosión teóricos, acentuándose hacia la zona central de la cuenca (Ver Tabla 5.26)

**Tabla 5.27** Resultados de índices de erosión del río Zuata TSP, USP, SSP

Zuata	Min	Max	Med	SD
TSP	0	3,998E+10	56,591E+06	1,964E+08
USP	0	6,427E+05	400,287	4187,984
SSP	0	7381,718	32,443	92,955
TSPP	0	3,523E+09	4,883E+05	1,726E+07
USPP	0	5,936E+04	72,329	695,022
SSPP	0	3,056E+03	12,503	39,474



**Figura 5.55** Mapas de índices de erosión del río Zuata a) TSP b) USP c) SSP d) TSPP e) USPP f) SSPP

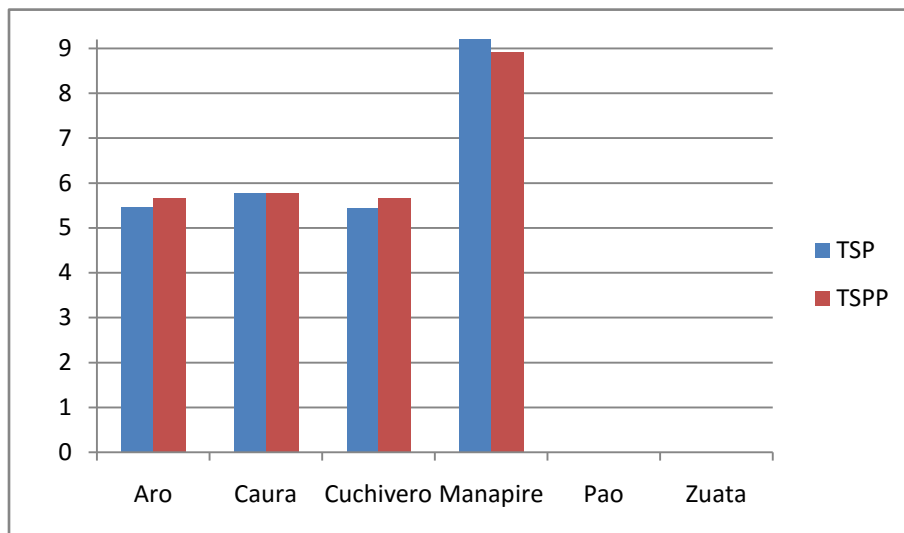
Para la cuenca del río Zuata los mapas de índices de erosión teóricos están representados mayormente por valores promedios alrededor de toda la cuenca. Si se observa la Figura 5.55 solo en algunas pequeñas partes se muestran sus valores máximo, como lo es; en la línea del perímetro de la cuenca hacia el NE, NO y en los valles de sus



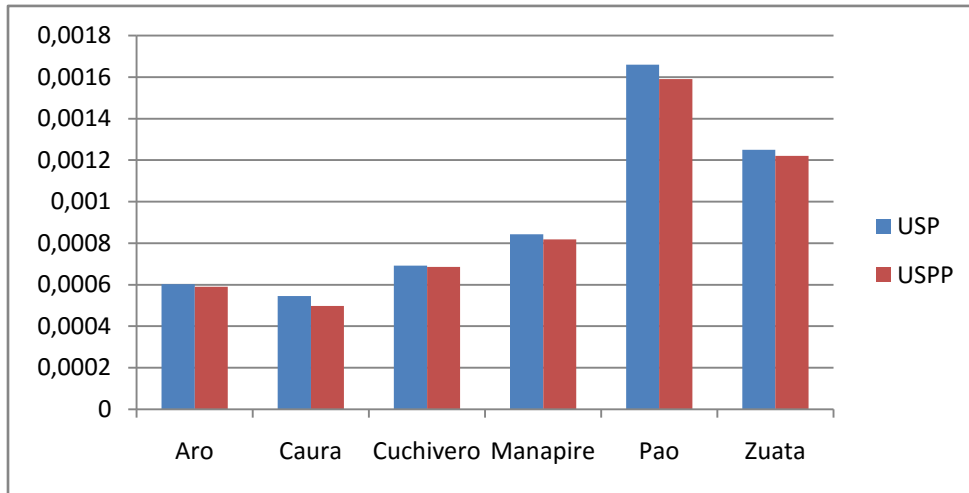
ríos. Aunque sus mapas de erosión teóricos son similares en cuanto a las zonas de máxima incisión, la incisión controlada por el poder de flujo total es la de mayor magnitud en toda la cuenca. Alcanzando valores máximos de 3,998E+10. De acuerdo a sus mapas de índices de erosión con precipitaciones se pueden observar mayor distribución de sus valores máximos hacia la periferia y zona central de la cuenca, y como se puede observar estos valores aunque son menores se ven más acentuados en los índices de erosión con precipitaciones. (Ver Tabla 5.27)

**Tabla 5.28** Promedio de los Índices de Erosión normalizados

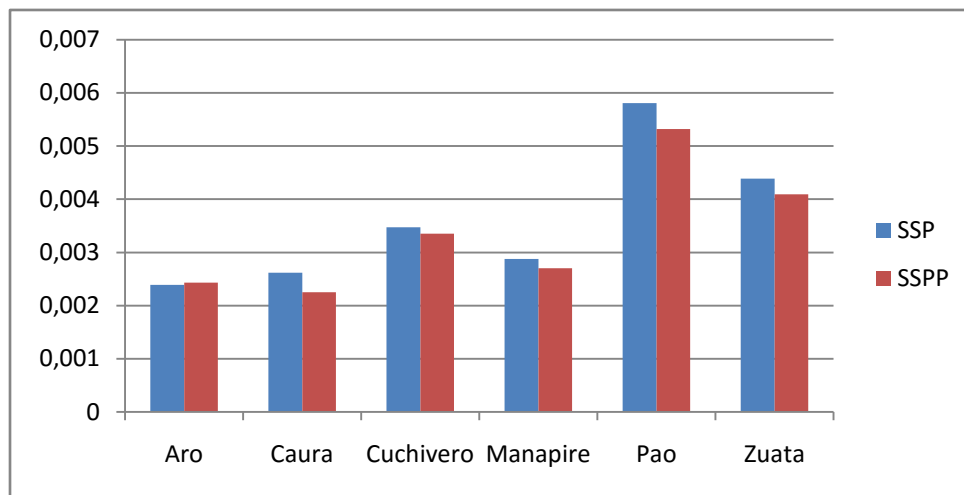
	<b>TSP</b>	<b>USP</b>	<b>SSP</b>	<b>TSPP</b>	<b>USPP</b>	<b>SSPP</b>
<b>Aro</b>	5,46	0,00060	0,00239	5,66	0,00059	0,00243
<b>Caura</b>	5,78	0,00055	0,00262	5,76	0,00050	0,00225
<b>Cuchivero</b>	5,45	0,00069	0,00347	5,67	0,00069	0,00335
<b>Manapire</b>	9,22	0,00084	0,00288	8,92	0,00082	0,00270
<b>Pao</b>	0,00022	0,00166	0,00581	0,00022	0,00159	0,00532
<b>Zuata</b>	0,00014	0,00125	0,00439	0,00014	0,00122	0,00409



**Figura 5.56** Grafica de TSP y TSPP promedio normalizados



**Figura 5.57** Grafica de USP y USPP promedio normalizados



**Figura 5.58** Grafica de SSP y SSPP promedio normalizados

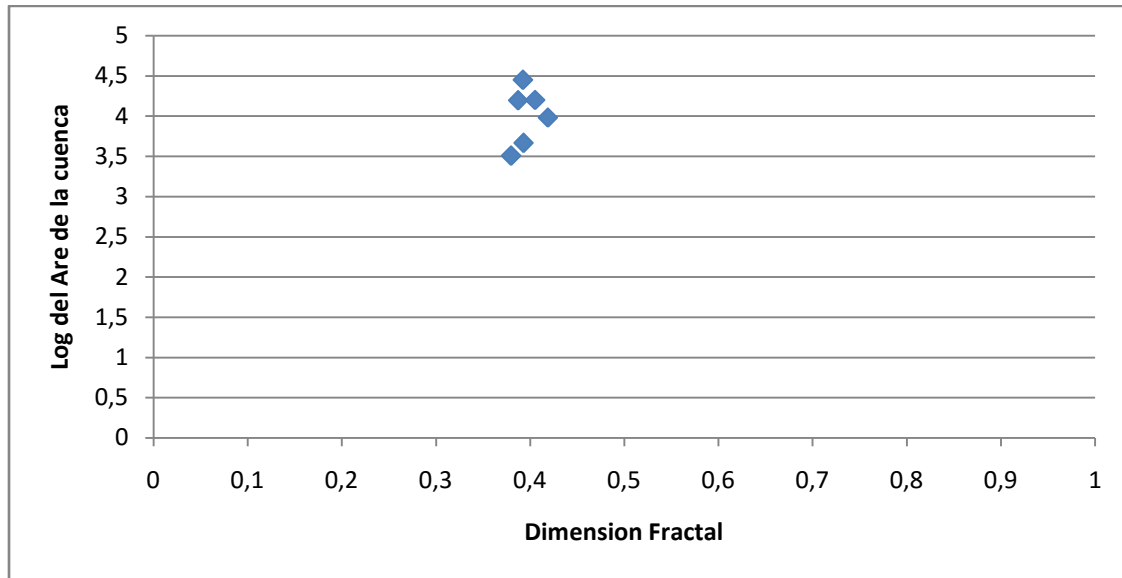
### 5.5.1 Calculo de la erosión y Dimensión fractal

Se calculo la red de drenajes, la acumulación y dirección de flujo, los datos son ordenados para estimar el orden de Strahler. Para este último es necesario contar con datos de la cantidad de arroyos y la longitud de cada uno se obtuvo relación de bifurcación  $R_B$  y la relación de orden de longitud  $R_l$  con lo que se calculo la dimensión fractal. A continuación se presentan en la Tabla 5.29 los resultados para cada una de las subcuencas

**Tabla 5.29** Resultados del cálculo de dimensión fractal de las subcuencas

río	Aro	Caura	Cuchivero
DF	0,387	0,392	0,405
río	Pao	Manapire	Zuata
DF	0,379	0,418	0,392

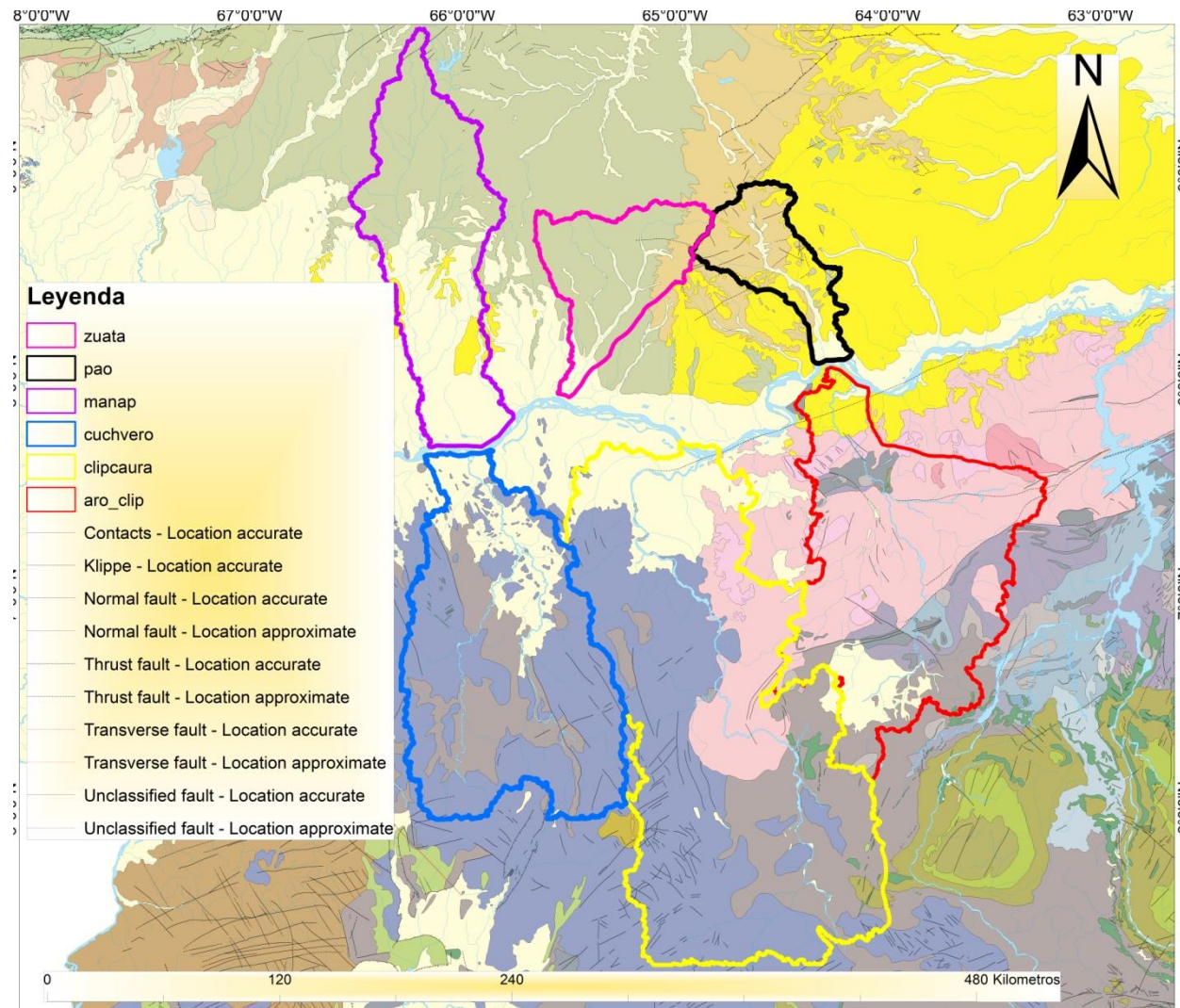
Como se puede observar en la Figura 5.59 los datos de geometría y dimensión fractal a simple vista son similares, es decir su autosimilaridad queda totalmente evidenciada tanto por los valores obtenidos como por los gráficos realizados. Las cuencas analizadas de acuerdo con los resultados presentan un mismo proceso predominante del modelado del relieve.



**Figura 5.59** dimensión fractal de las diferentes subcuencas que se encuentran en la zona central del río Orinoco hacia el sur y hacia el norte del mismo

## 5.6 INDICE DE FALLAMIENTO

También se calculó un índice de fallamiento para correlacionar con los datos antes presentados. Este índice permite conocer como la tectónica influye en el modelado del relieve de la zona de estudio. Para el río Aro se observó en la figura 5.60 en su cuenca 22 fallas y 16 epicentros sísmicos, por lo que su índice de fallamiento es de 352. Para el río Caura por su parte se encontraron 80 fallas en su cuenca y solo 3 epicentros sísmicos dentro de la misma, y su índice de fallamiento resultó de 240. Mientras que para el río Cuchivero se encontraron 27 fallas y 3 epicentros sísmicos dentro de la cuenca, lo que dio como resultado un índice de fracturamiento de 81. Sin embargo si se observa la figura 5.60 en el río Manapire no se encontraron epicentros dentro de la cuenca y solo 5 fallas, razón por la cual su índice de fallamiento es 5. En cambio para el río Pao se observaron 22 fallas y 9 epicentros dentro de la cuenca, por lo que resulta el mayor índice de fallamiento de la zona de estudio con 192. Y por último se encontraron para el río Zuata 1 sola falla y 3 epicentros sísmicos, por que junto con el río Manapire tienen el menor índice de fallamiento con 3.



**Figura 5.60** Mapa Geológico de la zona central de la cuenca del río Orinoco

## 5.7 ANALISIS DE LAS INTERACCIONES ENTRE CLIMA, RELIEVE Y TECTONICA MEDIANTE ANALISI DE CORRELACION LINEAL (PEARSON) Y REGRESION LINEAL MULTIPLE

**Tabla 5.30** Parámetros promedio obtenidos para cada una de las cuencas en estudio

	Precipitación	Relieve10km	Relieve20km	Relieve50km	WI	SPI	STI	CTI	TSP	USP	SSP	TSPP	USPP	SSPP	ksn	IF
Aro	1789,05	22,08	37,37	72,55	8,15	291463,31	281,56	29329,26	16627866,41	332,16	45,60	2629162,48	128,73	22,75	8,41	352
Caura	2455,32	33,47	56,82	111,87	10,42	703368,31	297,08	142522,56	33050990,43	413,35	69,43	6898260,45	172,62	31,75	73,20	240
Cuchivero	1913,58	49,58	87,19	176,37	9,32	442920,35	306,67	65517,10	20346218,93	422,76	74,15	3410152,78	168,26	35,89	28,70	81
Manapire	1256,64	8,50	12,97	22,12	10,41	168074,34	325,11	9560,00	9616285,85	279,32	32,71	962786,89	84,99	13,33	8,45	5
Pao	951,98	10,19	16,34	29,58	10,27	74068,27	307,62	3492,71	4239929,92	231,14	32,01	343241,85	63,28	11,84	13,90	198
Zuata	1091,73	8,42	12,72	21,81	10,28	97707,47	301,69	5412,27	5591096,67	249,75	32,44	488286,65	72,33	12,50	8,54	3

**Tabla 5.31** Valores de coeficiente de correlación de Pearson para cada uno de los parámetros mostrados en la Tabla 5.30

	<i>Precipitacion</i>	<i>Relieve10km</i>	<i>Relieve20km</i>	<i>Relieve50km</i>	<i>WI</i>	<i>SPI</i>	<i>STI</i>	<i>CTI</i>	<i>TSP</i>	<i>USP</i>	<i>SSP</i>	<i>TSPP</i>	<i>USPP</i>	<i>SSPP</i>	<i>ksn</i>	<i>IF</i>
Precipitacion	1,00															
Relieve10km	<b>0,78</b>	1,00														
Relieve20km	<b>0,77</b>	1,00	1,00													
Relieve50km	<b>0,77</b>	1,00	1,00	1,00												
WI	<b>-0,26</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,36</b>	1,00											
SPI	0,98	0,78	0,77	0,76	-0,08	1,00										
STI	<b>-0,43</b>	<b>-0,25</b>	<b>-0,25</b>	<b>-0,25</b>	0,69	-0,31	1,00									
CTI	0,93	0,70	0,69	0,69	0,07	0,98	-0,28	1,00								
TSP	<b>0,99</b>	<b>0,75</b>	<b>0,74</b>	<b>0,73</b>	-0,14	0,99	-0,36	0,97	1,00							
USP	<b>0,94</b>	<b>0,94</b>	<b>0,93</b>	<b>0,93</b>	-0,30	0,92	-0,28	0,85	0,91	1,00						
SSP	<b>0,89</b>	<b>0,97</b>	<b>0,97</b>	<b>0,96</b>	-0,22	0,90	-0,27	0,85	0,88	0,98	1,00					
TSPP	<b>0,97</b>	<b>0,71</b>	<b>0,70</b>	<b>0,70</b>	-0,07	0,99	-0,37	0,99	0,99	0,88	0,85	1,00				
USPP	<b>0,96</b>	<b>0,92</b>	<b>0,91</b>	<b>0,91</b>	-0,34	0,94	-0,37	0,87	0,94	0,99	0,97	0,90	1,00			
SSPP	<b>0,89</b>	<b>0,98</b>	<b>0,97</b>	<b>0,97</b>	-0,34	0,88	-0,33	0,81	0,87	0,99	0,99	0,83	0,98	1,00		
ksn	0,82	<b>0,58</b>	<b>0,56</b>	<b>0,56</b>	0,28	0,91	-0,17	0,97	0,88	0,71	0,75	0,92	0,73	0,68	1,00	
IF	0,46	<b>0,22</b>	<b>0,21</b>	<b>0,21</b>	-0,59	0,37	-0,79	0,34	0,42	0,27	0,25	0,44	0,37	0,30	0,28	1,00

**Tabla 5.32** Correlación múltiple con el relieve 10km

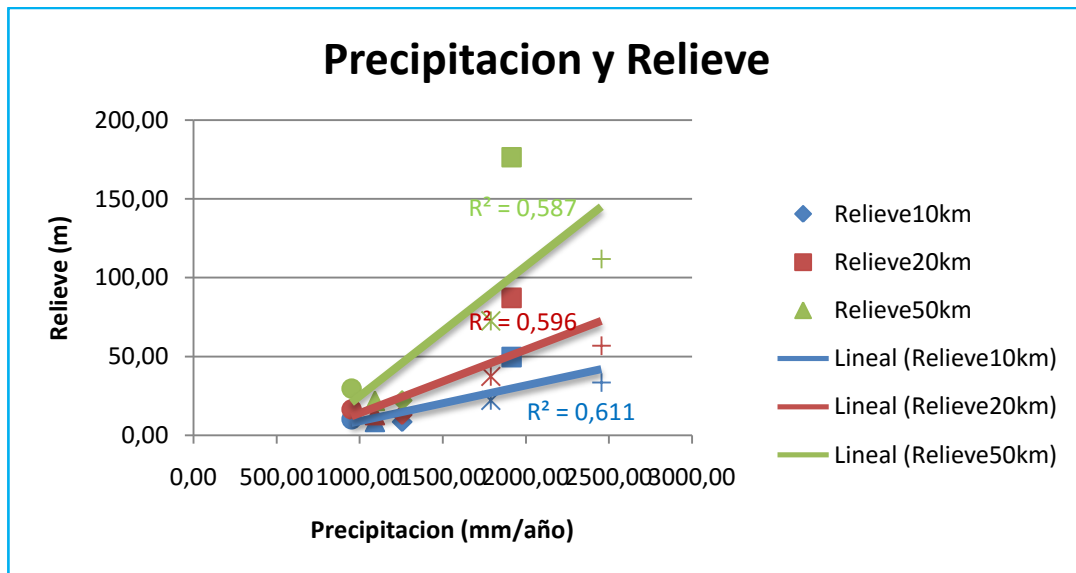
<i>Estadísticas de la regresión</i>								
Coefficiente de correlación múltiple	0,799119236							
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,638591553							
R <sup>2</sup> ajustado	0,397652588							
Error típico	12,97918703							
Observaciones	6							
ANÁLISIS DE VARIANZA								
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>			
Regresión	2	892,9787124	446,4893562	2,650428722	0,217268842			
Residuos	3	505,3778876	168,4592959					
Total	5	1398,3566						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	-14,43976289	16,80885843	-0,859056726	0,453473949	-67,9330523	39,05352652	-67,9330523	39,05352652
IF	-0,021934246	0,046600904	-0,47068285	0,669974961	-0,170239119	0,126370627	-0,170239119	0,126370627
Precipitacion	0,025179872	0,011358596	2,216812023	0,11337932	-0,010968249	0,061327993	-0,010968249	0,061327993

**Tabla 5.33** Correlación múltiple con el relieve 20km

<i>Estadísticas de la regresión</i>								
Coefficiente de correlación múltiple	0,78945082							
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,6232326							
R <sup>2</sup> ajustado	0,37205433							
Error típico	23,7873485							
Observaciones	6							
ANÁLISIS DE VARIANZA								
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>			
Regresión	2	2807,95511	1403,97755	2,48123612	0,23126504			
Residuos	3	1697,51384	565,837948					
Total	5	4505,46895						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	-27,4392872	30,8061031	-0,89070945	0,43870395	-125,478056	70,5994817	-125,478056	70,5994817
IF	-0,03924144	0,08540688	-0,45946458	0,67714968	-0,31104426	0,23256139	-0,31104426	0,23256139
Precipitacion	0,04467388	0,02081724	2,14600374	0,12116401	-0,02157588	0,11092363	-0,02157588	0,11092363

**Tabla 5.34** Correlación múltiple con el relieve 50km

<i>Estadísticas de la regresión</i>								
Coeficiente de correlación múltiple	0,783904961							
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,614506987							
R <sup>2</sup> ajustado	0,357511646							
Error típico	49,78499283							
Observaciones	6							
<b>ANÁLISIS DE VARIANZA</b>								
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>			
Regresión	2	11853,005	5926,502499	2,391121112	0,239345224			
Residuos	3	7435,636535	2478,545512					
Total	5	19288,64153						
	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	-60,45164367	64,47467741	-0,937602887	0,417616131	-265,6388426	144,735555	-265,6388426	144,7355552
IF	-0,081640636	0,178749689	-0,456731623	0,678904586	-0,650501924	0,48722065	-0,650501924	0,487220653
Precipitacion	0,091852868	0,0435688	2,108225778	0,125578674	-0,0468025	0,23050824	-0,0468025	0,230508236



**Figura 5.61** Comparación entre la precipitación y el relieve para los diferentes radios. En esta Figura los círculos con el río Pao, los triángulos el río Zuata, los rombos el río Manapire, los cuadrados el río Cuchivero, los asterisco el río Aro y el signo positivo el río Caura.

Al obtener los parámetros correlacionados (Tabla 5.31), se observan diferentes características que pueden ayudar a definir qué proceso controlador del relieve interviene principalmente en la zona. Primero se puede observar una alta correlación entre el relieve y la precipitación que van desde 0,78 – 0,77, lo que sugiere que el clima es un factor predominante en el modelado del relieve de esta zona. Al observar los altos valores de correlación de los índices de erosión tanto teóricos como con precipitaciones reales se puede decir que confirma que el clima juega un rol fundamental para la formación del relieve actual de la zona central del río Orinoco. Por su parte si se observan los valores de humedad y capacidad de transporte de sedimentos, existe una anti correlación con valores de -0,35 y -0,36 para el WI y -0,25 para STI, por lo que se puede inferir que la pendiente no juega un papel importante en el modelado del relieve. En cambio si se observa los valores de ksn van 0,58 a 0,56 lo que representa una correlación mediamente importante con el relieve, pasando a tener un papel menos importante en el modelado del relieve de esta zona. Para el índice de fallamiento se tiene que hay una correlación baja (0,22 – 0,21) lo que indica que no representa un factor predominante en el modelado del relieve.

En la Figura 5.61 se puede observar la comparación entre el relieve calculado a diferentes radios y la precipitación, se puede decir que a medida que aumenta el radio disminuye la relación  $r^2$ , sin embargo como se puede observar la disminución es de menos de un punto por cual se puede decir que permanece prácticamente constante.



## 5.8 ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN ENTRE EL RELIEVE ACTUAL Y LA GEOMORFOLOGÍA DE LAS CUENCAS

Para analizar la interacción del relieve con los diferentes aspectos tectónicos, litológicos y climáticos que puedan afectar el mismo hay que conocer sus características principales lo que requiere una comparación entre las cuencas para entender las diferentes anomalías que puedan presentar. Primero se realiza una comparación entre la litología de sus lechos, luego de sus atributos primarios y luego se identifica uno por uno cuales son los factores que les podrían estar generando su relieve actual.

La litología de los ríos al sur del Orinoco es mayormente de tipo Ígnea y metamórfica, generalmente son de las provincias Imataca y Cuchivero. Y al norte se tiene la presencia de una gran extensión de roca sedimentaria como lo es la Formación Mesa. También se puede observar en la Figura 5.62 una mayor variabilidad litológica en los ríos que están sur.

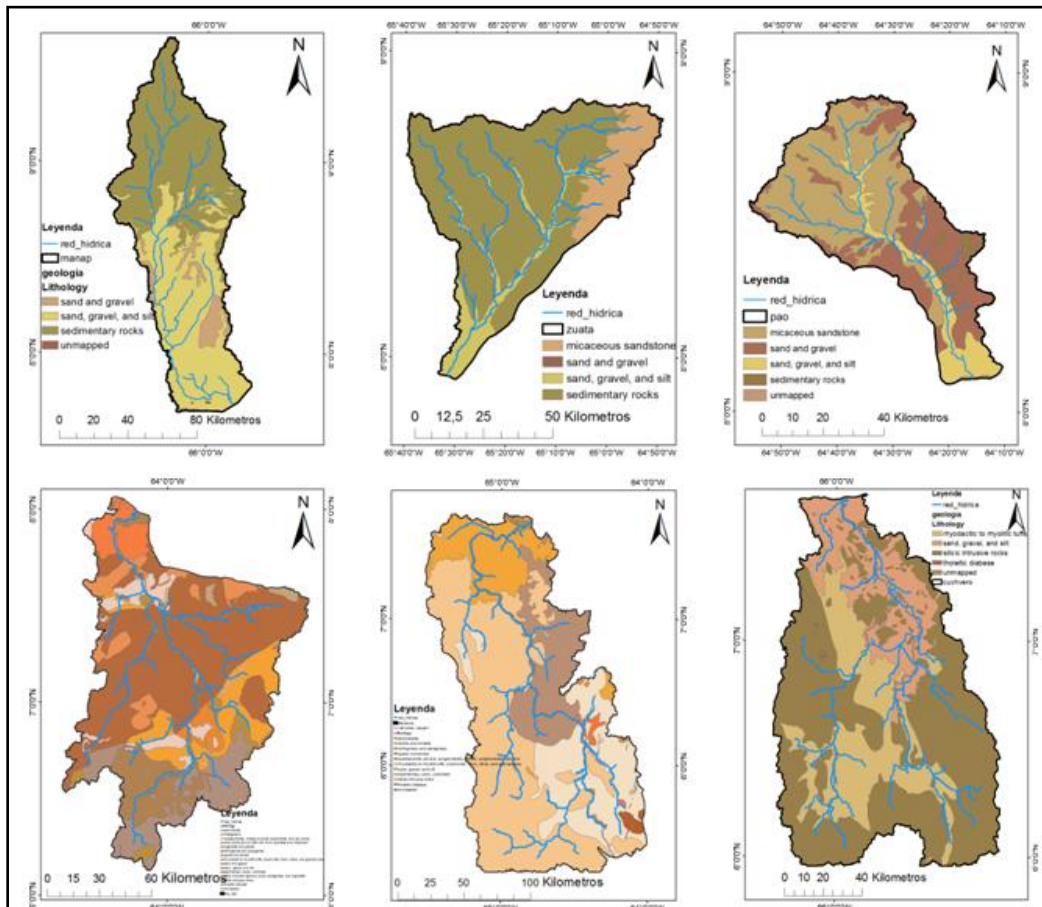
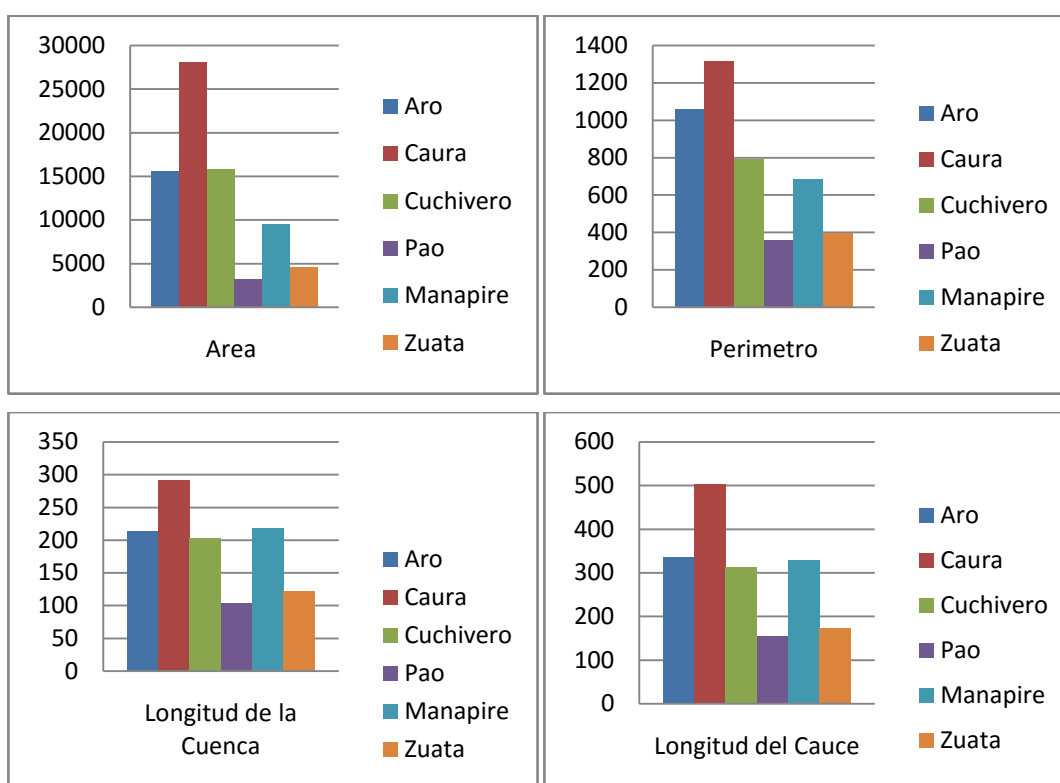


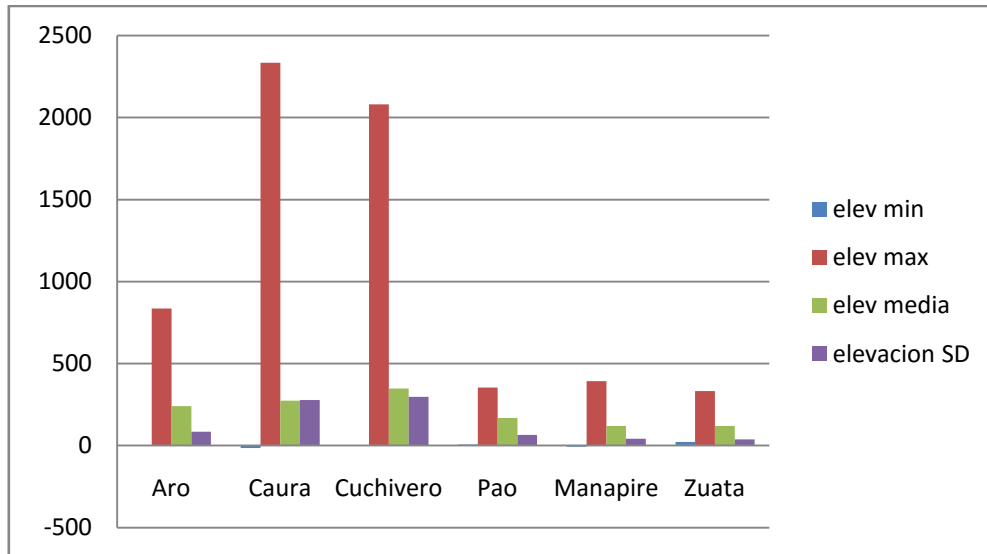
Figura 5.62 Litología de las subcuencas

Las cuencas estudiadas presentan una similitud en los cambios entre una y otra, las cuencas que están al sur de la cuenca presentan valores mayores de área y perímetro; mientras que los valores de longitud tienen una pequeña diferencia en esto ya que el valor de longitud de la cuenca del río Manapire al norte del río Orinoco tiene una longitud mayor que el río Aro que esta Al sur del río Orinoco. En cuanto a la longitud del cauce de igual manera son similares los valores entre los ríos al sur del río Orinoco, por su parte las que están al norte también guardan similitud los ríos Pao y Zuata a excepción del río Manapire que guarda más relación con los Ríos al sur en cuanto a su longitud. Figura 5.63



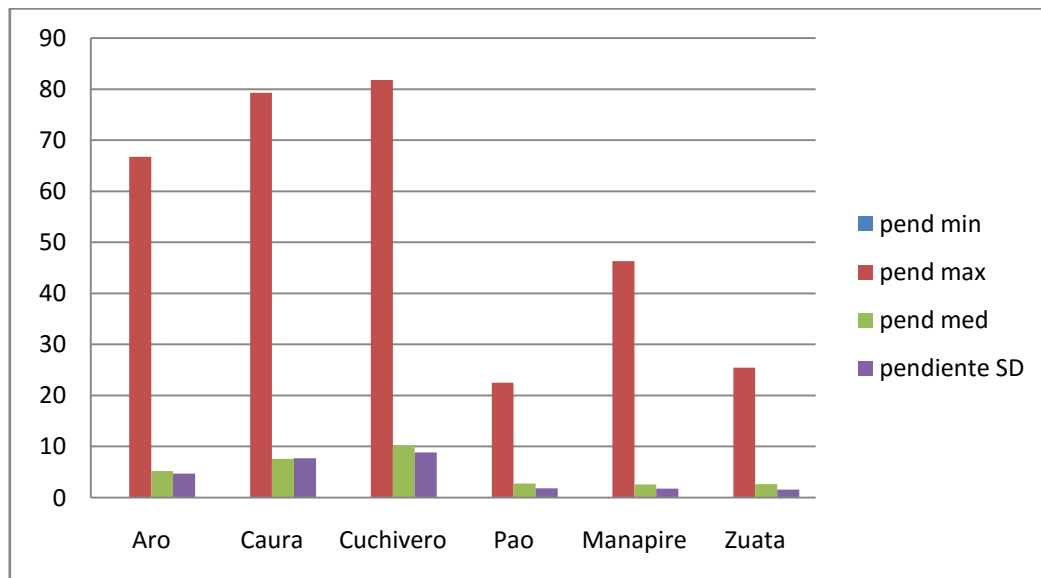
**Figura 5.63** Comparación de a) área, b) perímetro, c) longitud de las cuencas y d) longitud del cauce

Como puede observarse en la Figura 5.64 los valores de elevación máxima de cada subcuenca son mayores en las que están al sur de la cuenca del Orinoco como son Aro (837 m), Caura (2335 m) y Cuchivero (2080 m) mientras que los valores de elevación máxima de cada subcuenca son menores en las que se encuentran hacia el norte de la cuenca del Orinoco como son Pao (354 m), Manapire (393 m) y Zuata (333 m).



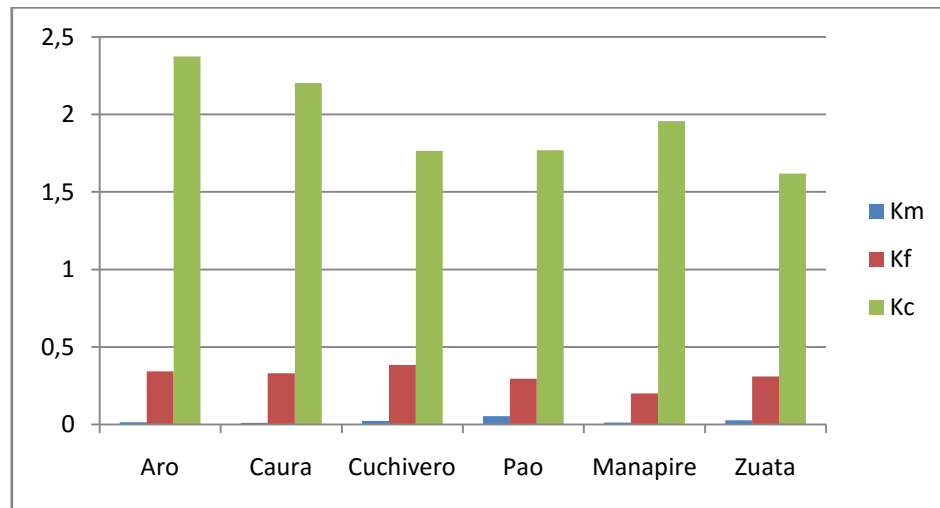
**Figura 5.64** Comparación entre las elevaciones de las diferentes subcuencas

Entre las cuencas estudiadas, de acuerdo a la Figura 5.65, la que tiene mayor pendiente media es la cuenca del río Cuchivero (10.243°), y la que tiene menor pendiente media es la de la cuenca del río Manapire (2.55°), mientras que si hablamos de las zonas en cada cuenca que logran alcanzar los máximos valores de pendientes, el mayor valor es alcanzado por la cuenca del río Cuchivero y el menor por la cuenca del río Pao. También se puede observar en la Figura 5.65 como los mayores valores de pendiente están en las cuencas al sur del río Orinoco y lo menores valores en las cuencas al norte del río Orinoco.



**Figura 5.65** Comparación entre las pendientes de las diferentes subcuencas

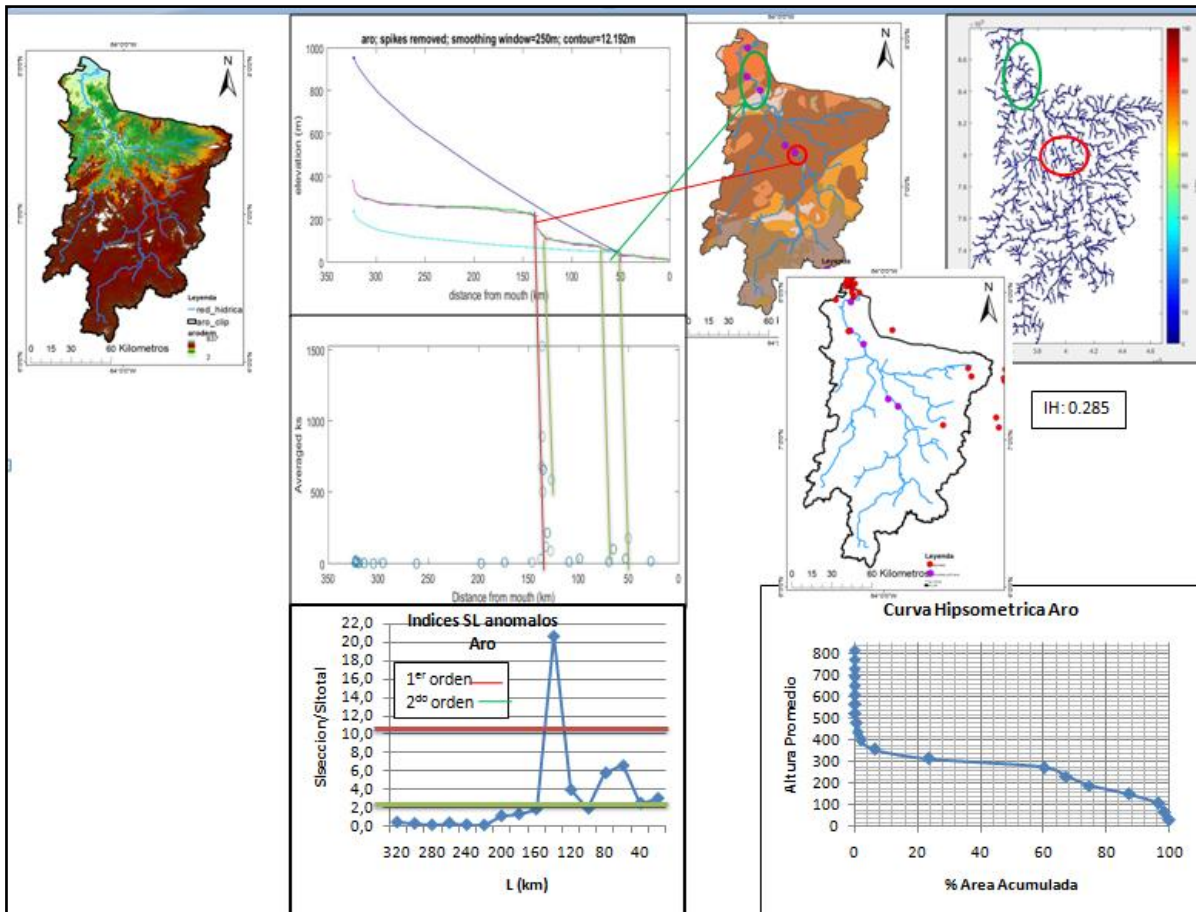
Si se observa la Figura 5.66 al comparar los índices compacidad, masividad y el factor forma se puede observar que las cuencas son morfométricamente similares.



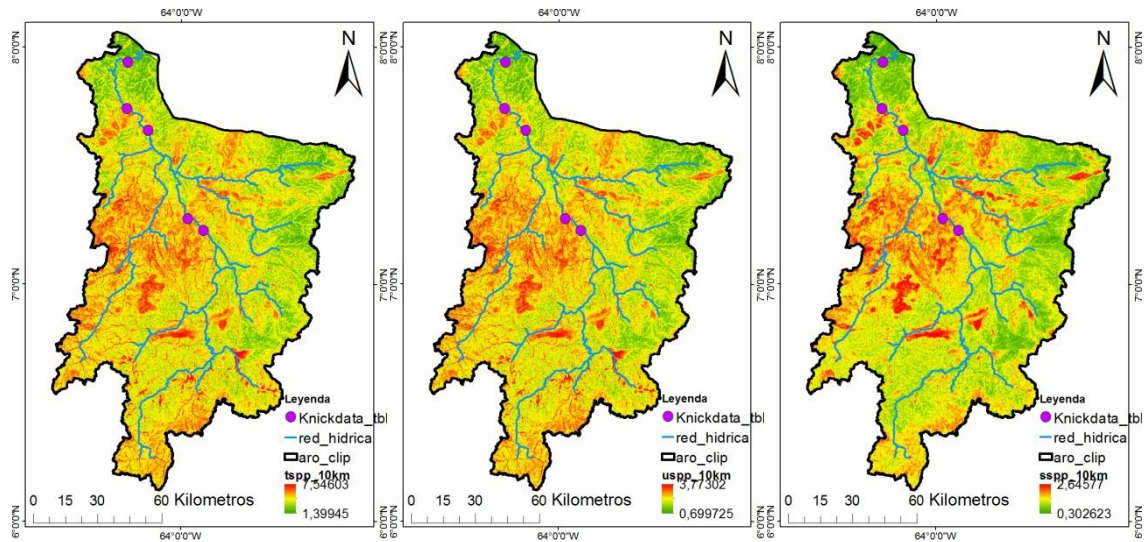
**Figura 5.66** Comparación entre los índices de: a) Km, b) Kc y c) Kf de todas las cuencas

El río Aro se encuentra en el Escudo Guayanés el cual es un frente montañoso que alcanza los 800 m con una dirección del relieve sur noroeste y sur norte. Tiene un área de alrededor de 15000 km<sup>2</sup> y una longitud del cauce de 334 km. Con pendientes medias de 5°. Su cuenca es rectangular oblonga a casi rectangular (alargada) moderadamente achatada, muy montañosa y con poca peligrosidad durante las crecidas que no son muy continuas. Su lecho está constituido por gneises félsicos y maficos intercalados con capas de cuarcitas ferruginosas y granulitas con cuerpos delgados interestratificados de rocas graníticas. De acuerdo con su curva hipsométrica e integral hipsométrica el río se encuentra en un estado intermedio entre el estado de equilibrio y desequilibrio. Tiene un perfil longitudinal cóncavo en el cual se pudo identificar un desequilibrio aparente con puntos de inflexión (knickpoints) importantes. Se ubicaron 5 puntos en el perfil pero donde 3 de ellos se consideraron en mayor importancia como para estudiarlos y analizar su origen ya sea debido a levantamientos tectónicos, cambios litológicos y/o factores climáticos. Estos 3 knickpoints pudieron ser confirmados con el índice de verticalidad y el índice SL donde se observan anomalías en estas zonas que son muy representativas como se puede confirmar en la en la Figura 5.67. También se analizó la litología y se encontró que en el primer punto de inflexión que es el que representa una anomalía de 1<sup>er</sup> orden no tiene un cambio litológico que pudiera representar la causa de la inflexión. Por su parte los puntos 3<sup>ro</sup> y 4<sup>to</sup> que pudieran representar anomalías menores tienen cambios litológicos, lo que pudiera ser

indicativo de la razón de la anomalía. De acuerdo con los epicentros sísmicos obtenidos de la base de datos de Ingeomin si observamos el 1<sup>er</sup> knickpoints este no presenta epicentros, en cambios los últimos dos knickpoints tienen epicentros muy cercanos que pudieran representar zonas de fallas. Cuando se observa la Figura 5.68 las zonas donde los índices de erosión son mayores en justo donde está la anomalía de 1<sup>er</sup> orden.



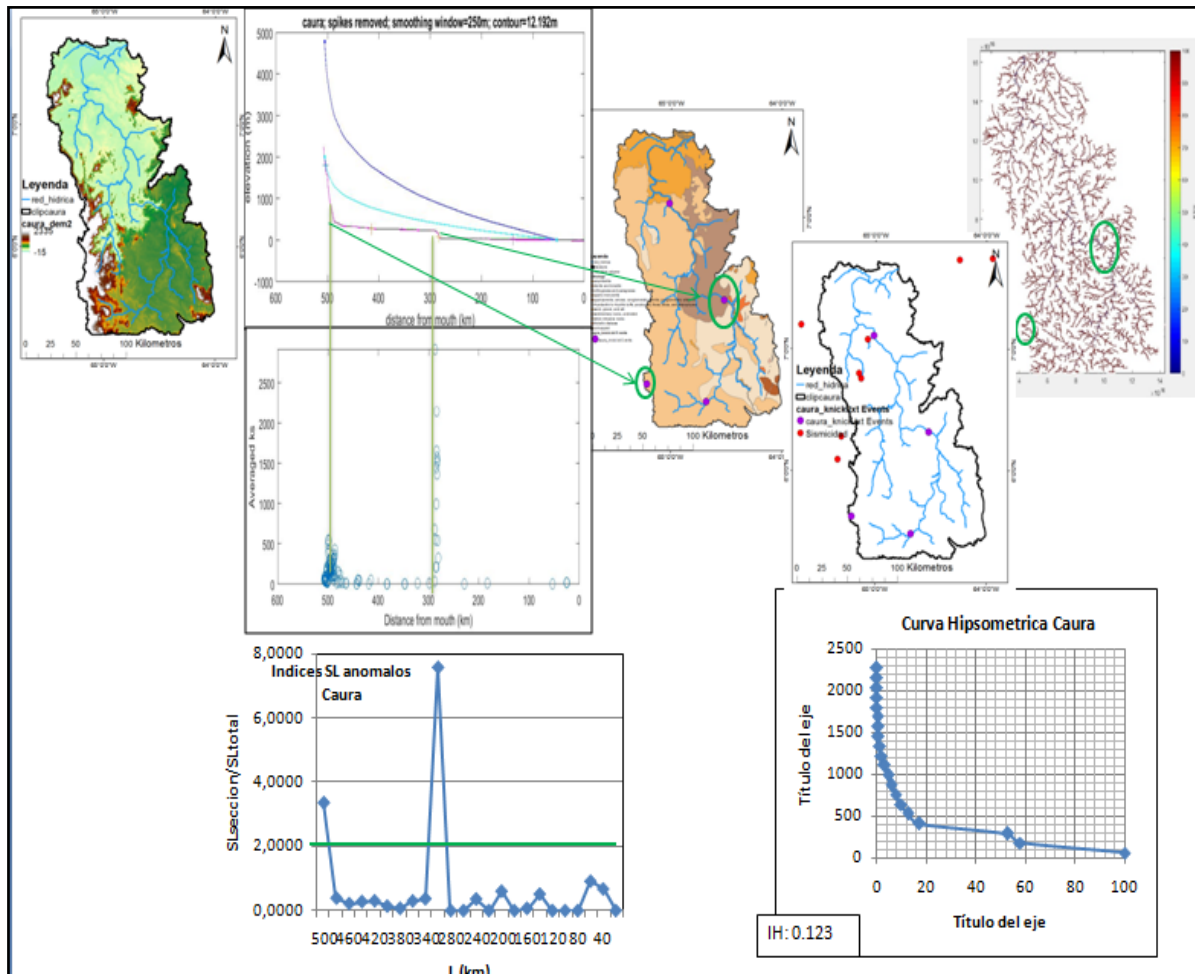
**Figura 5.67** Relación entre el perfil longitudinal, litología, curva hipsométrica, sismicidad, valor del índice de verticalidad y el índice SL.



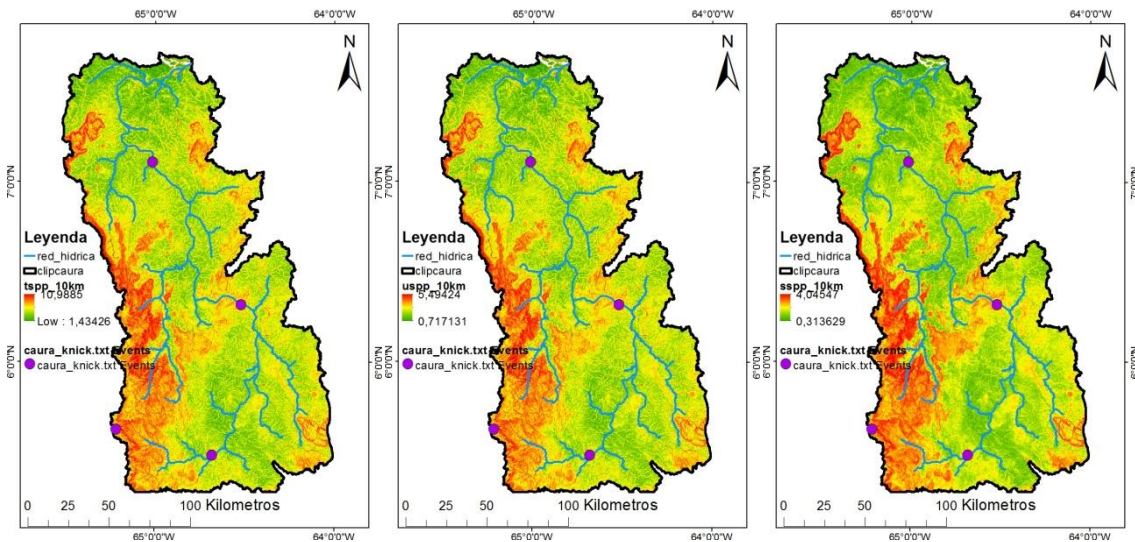
**Figura 5.68** Relación de cómo afectan los índices de erosión con precipitaciones en los knickpoints identificados

El río Caura el cual es el tercer río más grande de Venezuela se encuentra ubicado en el escudo Guayanés. Tiene un relieve accidentado en las periferias de la cuenca y más suave hacia la parte central de la misma con alturas que alcanzan 2300m. Tiene un área aproximada de 28000 km<sup>2</sup> y un largo del cauce principal de 503 km siendo el más largo de los estudiados en esta investigación. Las pendientes promedio alcanzan los 7°. Su cuenca es rectangular oblonga a casi rectangular (alargada) con poca tendencia a concentrar fuertes volúmenes de agua de escurrimiento que puedan generar muy fuertes crecidas. Su lecho está constituido de Gneises félsicos y maficos intercalados con capas de cuarcitas ferruginosas. Se graficó la curva hipsométrica y se calculó la integral hipsométrica donde se observo que el río esta en un estado de senectud. El perfil presenta una forma cóncava en cual se identificaron 4 knickpoints que claramente representan un desequilibrio creciente posiblemente por levantamiento tectónico, cambios litológicos y/o factores climáticos. En el mapa ksn y los cálculos del Stream – índice se pudo confirmar que 2 de los 4 de los knickpoints identificados tienen anomalías marcadas que son las causas del desequilibrio. Al estudiar estos dos knickpoints anómalos se pudo observar que no tiene cambios en la litología por lo que se pudiera decir que los cambios litológicos no son responsables del salto en el perfil lo que puede ser constatado en la Figura 5.69. De acuerdo a los epicentros sísmicos obtenidos por la base de datos de Ingeomin muestran que el 4<sup>to</sup> knickpoints tiene un epicentro sísmico justo en el mismo lugar. Como se puede observar en el mapa de sismicidad los knickpoints importantes identificados con las anomalías de ksn y SL que son

el 1<sup>er</sup> y 3<sup>er</sup> knickpoints no se encuentran cercanos a epicentros sísmicos. Cuando se observa la Figura 5.70, por su parte los índices de erosión afectan con mayor fuerza las zonas donde están los knickpoints 1<sup>ro</sup> y 3<sup>ro</sup> que son los que tienen mayor relevancia en el desequilibrio de la cuenca.



**Figura 5.69** Relación entre el perfil longitudinal, litología, curva hipsométrica, sismicidad, valor del índice de verticalidad y el índice SL.



**Figura 5.70** Relación de cómo afectan los índices de erosión con precipitaciones en los knickpoints identificados

El río Cuchivero por su parte se encuentra en el cratón de Guayana con un relieve montañoso en la periferia de la cuenca y zonas de cumbres altas en los interfluvios que alcanzan los 2080 m. Tiene un área aproximada de 15000 km<sup>2</sup> y una longitud del cauce principal de 203km. Su pendiente promedio es de 10°. Es rectangular oblonga a casi rectangular, muy montañosa y moderadamente achatada con menor tendencia a crecidas grandes. La litología de su lecho es de rocas plutónicas de emplazamiento epizonal a epimezonal. Tiene un perfil cóncavo con knickpoints evidentes, a pesar de que su curva hipsométrica refleja que está en estado de vejez, el perfil longitudinal se ve afectado por zonas de inflexión que reflejan un desequilibrio aparente. Entre todos los knickpoints seleccionados mediante observación se pudieron considerar importantes aquellos que coinciden con las anomalías en los valores de ksn y los valores de los índices SL lo que se puede verificar en la Figura 5.71. Donde se pudo evidenciar que los knickpoints 1<sup>ro</sup> y 2<sup>do</sup> son de mayor importancia en el cambio de la forma cóncava del perfil longitudinal. Se evaluó la litología y se observó que no existen cambios litológicos importantes en estos puntos de inflexión que pudieran representar la causa de este desequilibrio. Los knickpoints importantes mencionados anteriormente confirmados no presentan zonas sísmicas cercanas a ellos, según la base de datos sísmica de Ingeomin. A pesar de que los índices de erosión afectan gran parte de la cuenca se puede observar en la Figura 5.72 como los knickpoints 1<sup>ro</sup> y 2<sup>do</sup> quedan envueltos en las zonas de mayor erosión.



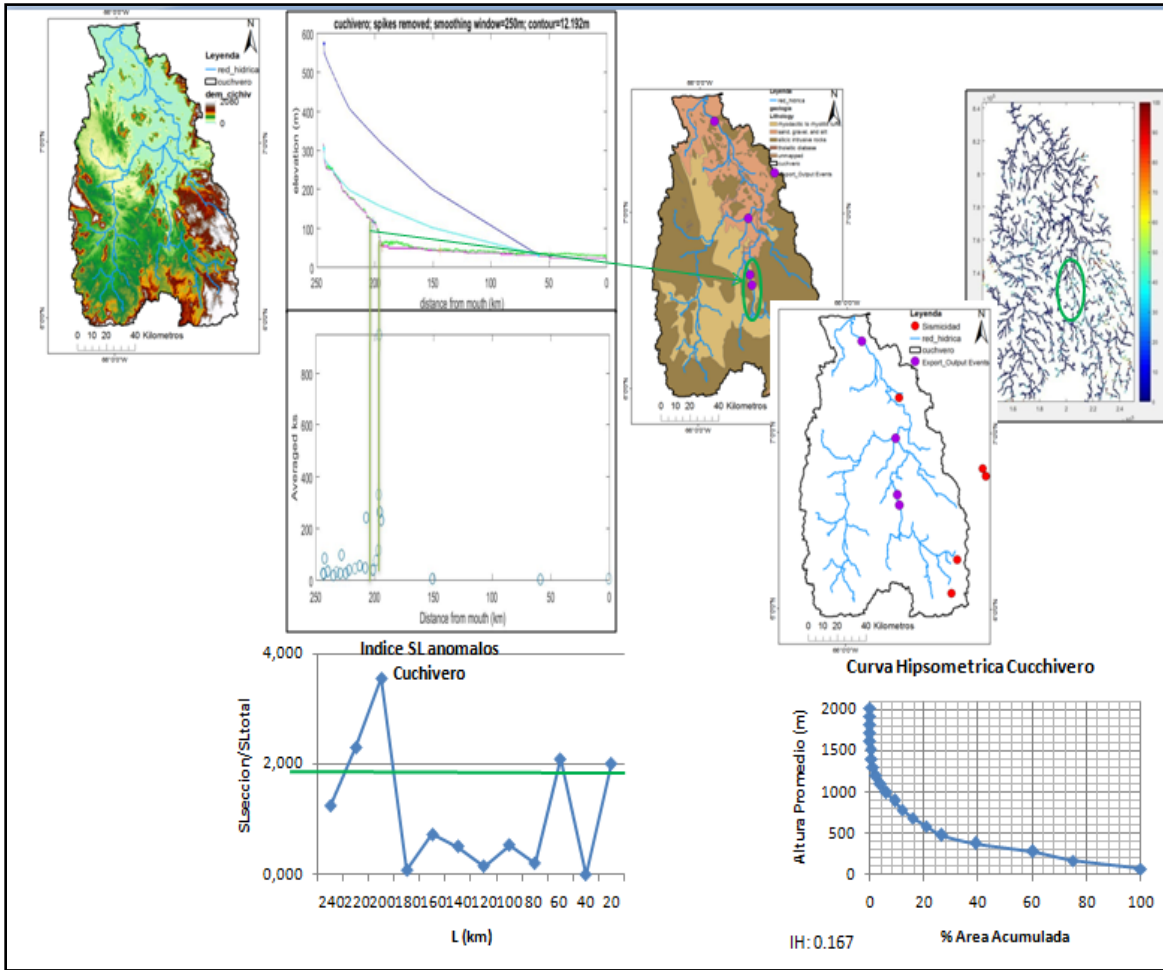


Figura 5.71 Relación entre el perfil longitudinal, litología, curva hipsométrica, sismicidad, valor del índice de verticalidad y el índice SL.

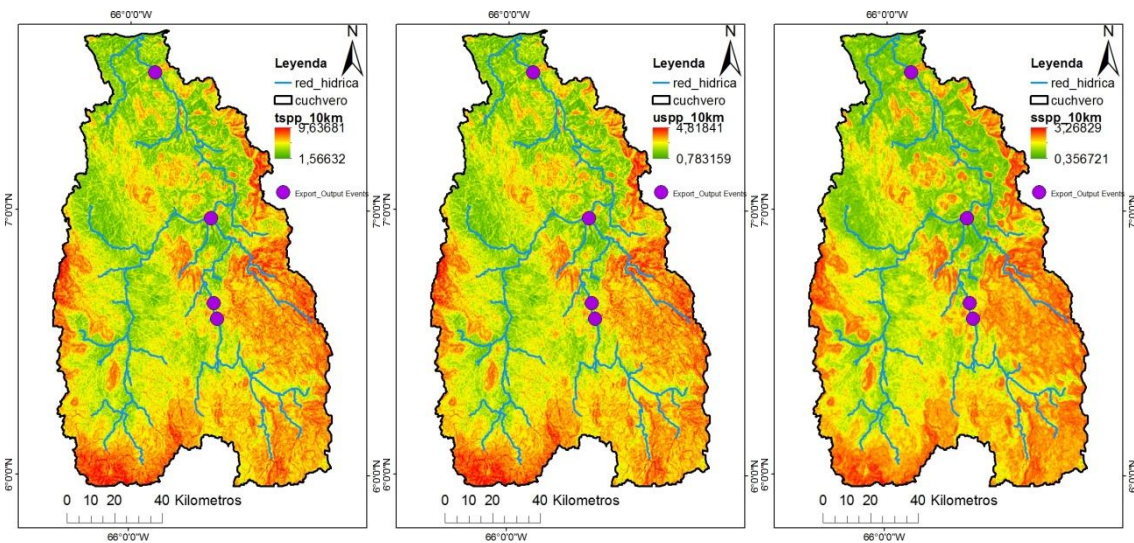
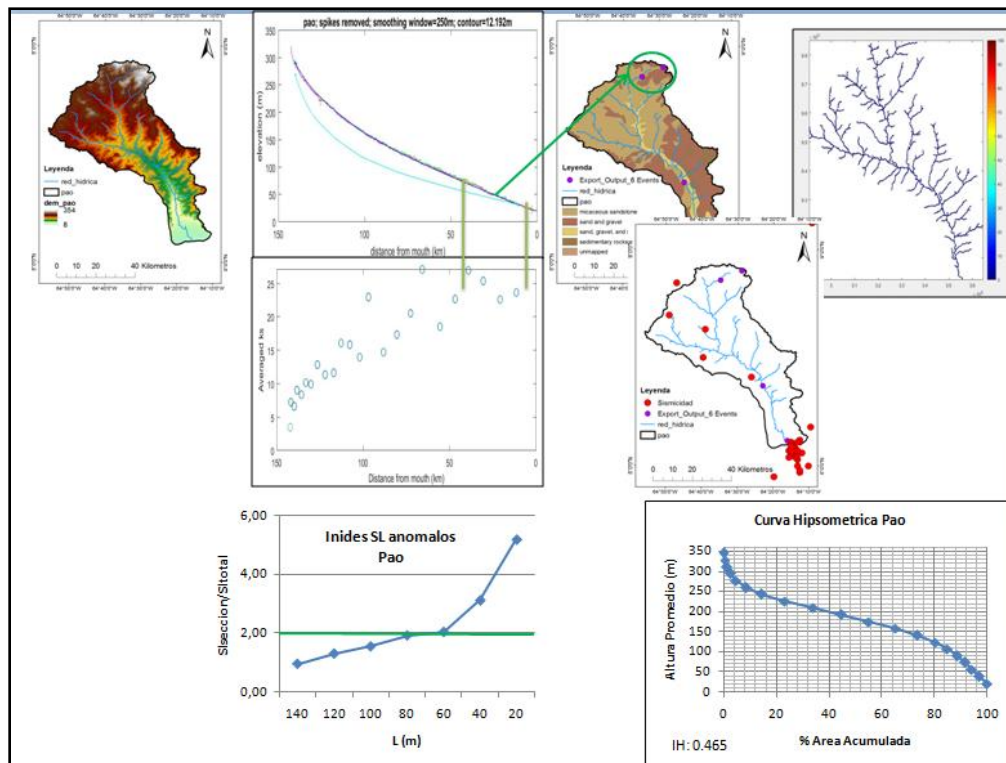
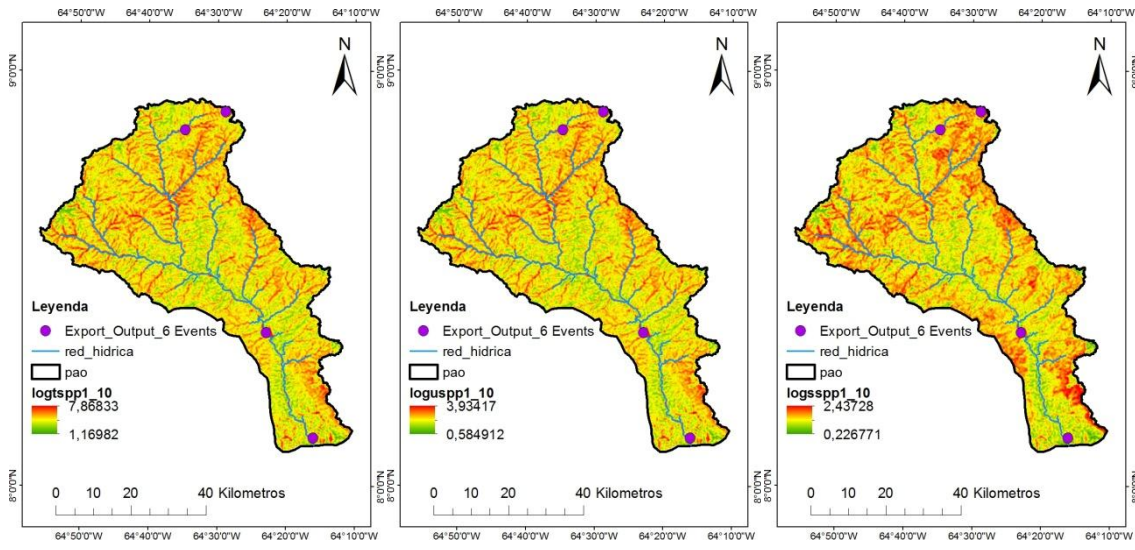


Figura 5.72 Relación de cómo afectan los índices de erosión con precipitaciones en los knickpoints identificados

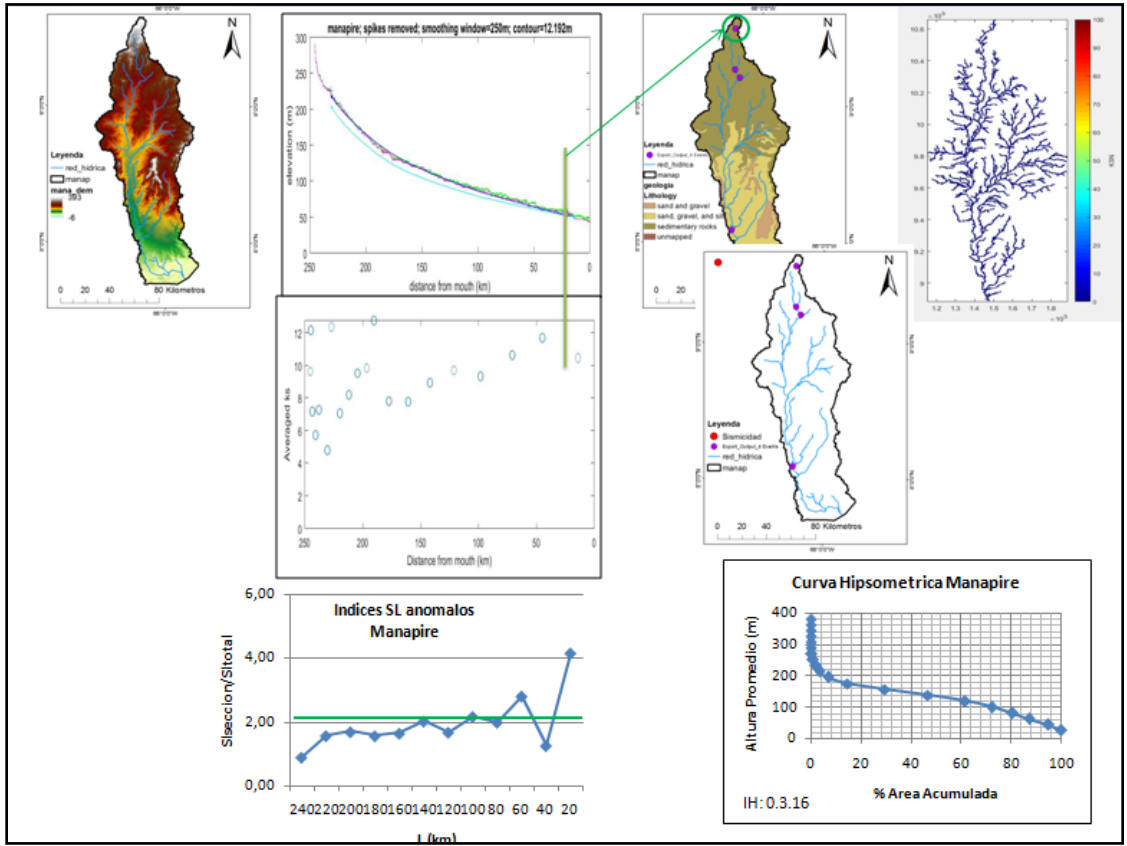
Por su parte los Ríos ubicados al norte de la cuenca del río Orinoco presentan relieve suave con desniveles progresivos de pocas cumbres que no superan los 400m. Son montañosas pero con poca peligrosidad a generar grandes crecidas y son ligeramente achatadas. Con longitudes del cauce que no superan los 350 km. Y áreas entre los 3000 y 10000 km<sup>2</sup>. Sus pendientes son similares y sus valores medios están entre 2-3°. Según su curva hipsométrica e integral hipsométrica están en equilibrio o en un punto medio entre el equilibrio y desequilibrio. Su perfil longitudinal es cóncavo y los knickpoints identificados son tan pequeños que no representan un punto de inflexión importante que pudiera causar desequilibrio en la cuenca, por lo cual se infiere que está en un estado de equilibrio aparente. A pesar de que en el índice del SL se obtuvieron algunas anomalías estas no fueron identificadas en el índice ksn ya que son muy pequeñas y no representan un desequilibrio importante lo que se puede confirmar al observar las Figuras 5.73, 5.75 y 5.77. En el mapa de sismicidad no tiene epicentros que estén muy cercanos a zonas de anomalías detectadas en los cálculos del Stream – índice. Al observar las Figuras 5.74, 5.76 y 5.78 los índices de erosión cuando se le agregan las precipitaciones estos abarcan muchas más zonas de erosión, aunque no generan un desequilibrio evidente en la cuenca.



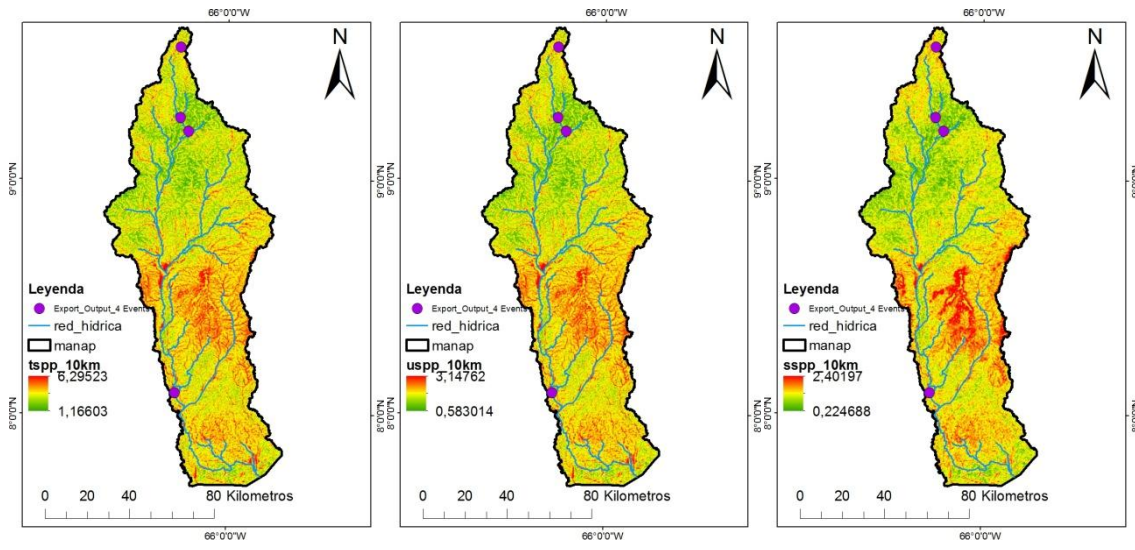
**Figura 5.73** Relación entre el perfil longitudinal, litología, curva hipsométrica, sismicidad, valor del índice de verticalidad y el índice SL.



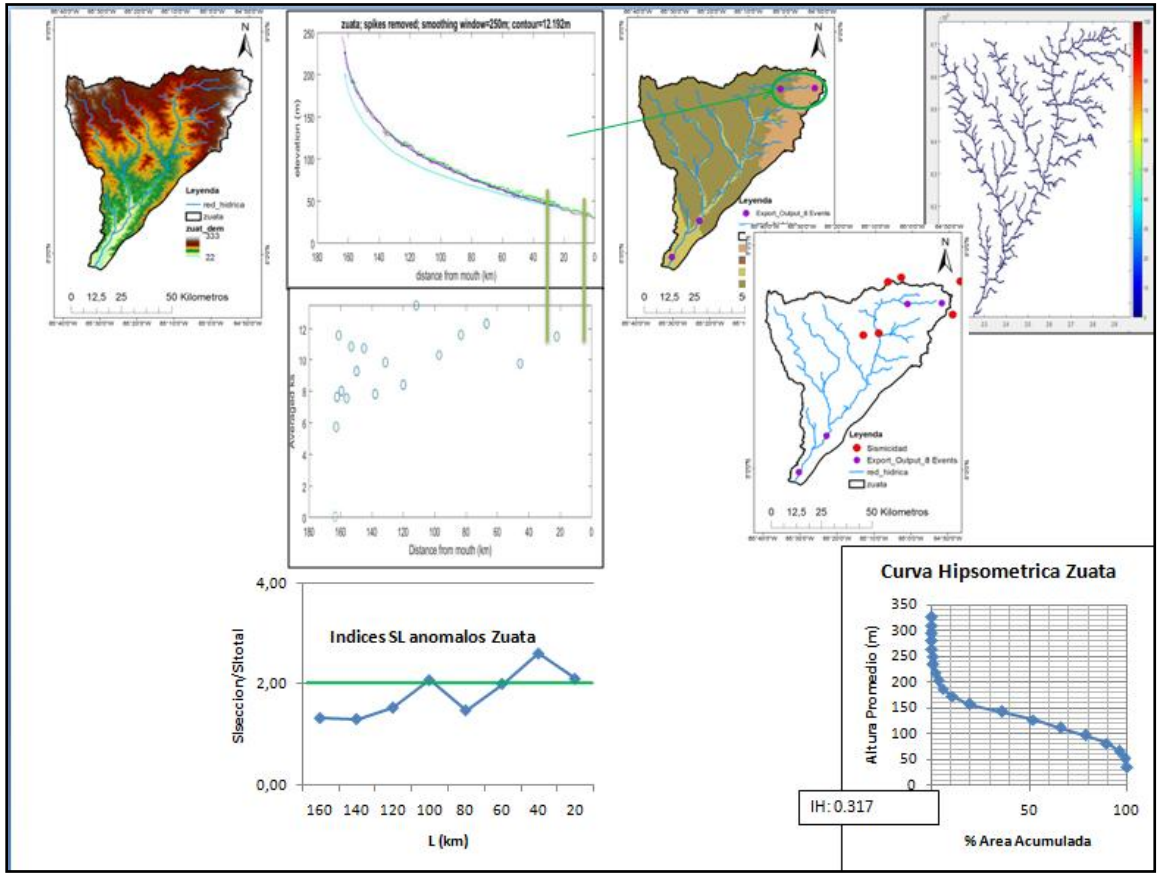
**Figura 5.74** Relación de cómo afectan los índices de erosión con precipitaciones en los knickpoints identificados



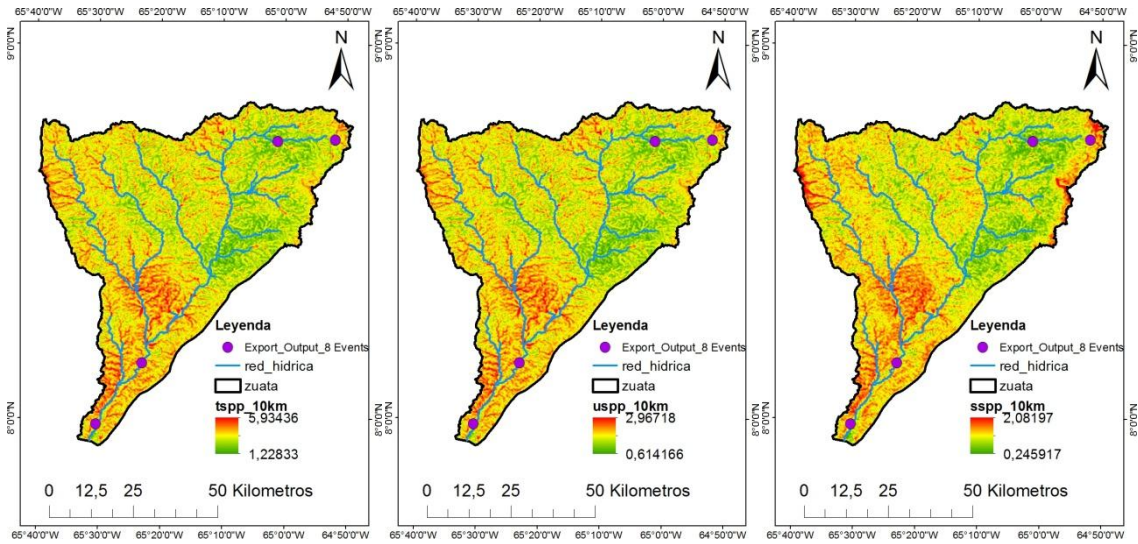
**Figura 5.75** Relación entre el perfil longitudinal, litología, curva hipsométrica, sismicidad, valor del índice de verticalidad y el índice SL.



**Figura 5.76** Relación de cómo afectan los índices de erosión con precipitación en los knickpoints identificados



**Figura 5.77** Relación entre el perfil longitudinal, litología, curva hipsométrica, sismicidad, valor del índice de verticalidad y el índice SL.



**Figura 5.78** Relación de cómo afectan los índices de erosión con precipitaciones en los knickpoints identificados

## CONCLUSIONES

1. Los ríos al sur del río Orinoco presentan perfiles longitudinales con marcados knickpoints que indican un desequilibrio, posiblemente indicando cambios en levantamientos superficiales representados por los knickpoints encontrados; en contraste, ríos al norte del río Orinoco no presentan knickpoints importantes que puedan afectar la tasa de levantamiento que indiquen desequilibrio en los perfiles.
2. La conclusión anterior es consistente con los mapas de verticalidad de la pendiente (ksn) donde las cuencas que presentan saltos en los valores de ksn son solo las que están al sur del río Orinoco.
3. Las anomalías encontradas en SL índice corresponden con los knickpoints identificados en el perfil, al ser analizada su litología; solo el río Aro tiene cambios litológicos en uno de sus knickpoints
4. Los atributos primarios permiten decir que son cuencas de extensión muy grande que presentan longitudes de cauce muy grandes (120 – 500 km) y elevaciones que van desde los 300 m hasta los 2500 m, son montañosas con formas rectangulares oblongas a casi rectangulares.
5. Por su parte, los atributos secundarios permiten estimar que la cuenca con mayor potencial erosivo es la cuenca del río Caura, y la cuenca del río Pao es la que tiene menor potencial erosivo de la zona de estudio.
6. Los mapas de erosión teóricos con precipitaciones uniformes muestran como los ríos que están al sur del río Orinoco tienen más zonas que alcanzan los máximos erosivos que las cuencas ubicadas al norte. Mientras los mapas de erosión con precipitaciones variables, muestran que las zonas que sufren erosiones máximas aumentan alrededor de todas las cuencas pero mucho más significativamente en las que están al norte del río Orinoco.
7. La influencia de la litología en la tasa de levantamiento tectónico de las cuencas no es lo suficientemente significativa para generar desequilibrios en la misma. Son muy pocos los cambios litológicos, por lo que se consideran que no influirían en el modelado del relieve.
8. Esta investigación a diferencia de estudios previos incluye el estudio de la tectónica y/o estructuras que puedan afectar el modelado terrestre, esto a través de análisis de

perfiles longitudinales, índices ksn, SL e índice de fallamiento (IF), que permiten identificar zonas de inflexión que generen desequilibrio.

9. El desequilibrio de las cuencas al sur del río Orinoco están limitadas solo por algunos puntos de inflexión importantes, pero así mismo estas mantienen su concavidad. Al correlacionar el IF se encontró que tiene una correlación baja con el relieve actual (0,22 – 0,21), lo que indica que la tectónica no juega un papel importante en la formación del relieve de la zona. Por su parte los resultados de la correlación del índice ksn indica que tiene una correlación mediana con el relieve (0,58 – 0,56), por lo que se concluye que la tectónica juega un papel secundario en la formación del relieve actual.
10. La anticorrelación del relieve con los atributos secundarios de humedad y transporte permiten decir que la pendiente no participa activamente en la formación del relieve actual.
11. La alta correlación de las precipitaciones y relieve (0,78 – 0,77), los índices teóricos así como los no teóricos (con precipitación variable) y el relieve; permite inferir que el clima tiene un papel fundamental en el modelado del relieve de la zona central del río Orinoco. De acuerdo a los cálculos de dimensión fractal existe un solo factor predominante en el modelado del relieve. Por lo tanto el clima se considera el factor predominante que puede generar el desequilibrio en las cuencas ubicadas al sur del río Orinoco.
12. Finalmente, un análisis de regresión múltiple considerando el relieve actual a distintos radios (10, 20 y 50 km) como variable dependiente de las variables precipitación (como representante de la variable climática) y el IF (como representante de la tectónica) sugieren un coeficiente de correlación de 0,78 con una mayor importancia de la variable climática sobre la tectónica, lo cual refuerza los análisis de correlación lineal realizados anteriormente.

## **RECOMENDACIONES**

1. La geomorfología cuantitativa puede volverse una herramienta más efectiva si a la misma se le logra establecer una relación con la geomorfología tradicional, para que al momento de trabajar con los diferentes valores, estos puedan ser traducidos a un lenguaje que el investigador común maneja; para ello es necesario recopilar los datos de todo el proyecto y así poder realizar la respectiva comparación.



## BIBLIOGRAFÍA

- Albornoz, M., y Lezama, A., (2014) “Comparación de la relación topoforma-clima-tectónica en el sector suroeste de la cuenca del río Orinoco mediante análisis de índices de erosión y minerales pesados”. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Geólogo P 191
- Arcia, S y Viana, C., (2013) .Estudio de la interacción clima, tectónica y procesos superficiales como agentes controladores del relieve actual en terrenos adyacentes a los ríos Nirgua, Boconó y Apure mediante caracterización mineralógica, análisis digital del terreno y estudio de minerales pesados. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Geólogo. pp 150 – 167
- Benedetto, J. (1982). Las unidades tectono-estratigráficas Paleozoicas del Norte de Suramérica, Apalaches del Sur y Noroeste de África; Comparación y Discusión. V Congreso Latinoamericano de Geología, Buenos Aires, Argentina
- Benedetto, J. y Ramírez, E. (1985). La Secuencia Sedimentaria Precámbrico-Paleozoico Inferior Pericratónica del Extremo Norte de Suramérica y sus Relaciones con las Cuenas del Norte de África. VI Congreso Geológico Venezolano. Vol. I, pp 140-155.
- Bookhagen, B. (in review): High resolution spatiotemporal distribution of rainfall seasonality and extreme events based on a 12-year TRMM time series, in review. Fecha de consulta: 30 de Octubre del 2018. <http://www.geog.ucsb.edu/~bodo/TRMM/>
- Burbank, D., y Anderson, R., (2001) Tectonic Geomorphology. Blackwell Science LTD. pp 1
- Castillo, M., Muños – Salinas. y Arce, J. (2015). Evaluación del sistema erosivo fluvial en el volcán Popocatepelt (Mexico) mediante análisis Morfométricos. Boletín de la sociedad geológica mexicana. Volumen 67. Numero 2. pp 167-183.
- Cobos, A., Navarro, A y Perles, R. (2004) Análisis Cuantitativo preliminar de la cuenca hidrográfica del río Grande (Málaga) mediante la utilización de sistemas de información geográfica. Geogaceta. 36. pp 135-138. Fecha de consulta: 07 de julio del 2016. <http://www.sociedadgeologica.es/archivos/geogacetas/Geo36/Art34.pdf>
- Cohen, C., Willgoose, G. y Hancock G. (2008). A methodology for calculating the spatial distribution of the area – slope equation and the hypsometric integral within a catchment. Journal of geophysical research vol 1136.

- Comerma, J. y Chirinos, A. (1976). Características de algunos suelos con y sin horizonte argílico en las mesetas orientales de Venezuela. Trabajo presentado en el IV Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. Maturín, Venezuela, pp 181-206.
- Doranti – Tiritan, C., y otros (2014). The Use of the Stream Length – Gradient Index in Morphotectonic Analysis of Drainage Basins in Poços de Caldas Plateau, SE Brazil. *International Journal of Geosciences*. pp 186
- Escalona, A y Mann, P (2011) Tectonics, basin subsidence mechanisms, and paleogeography of the Caribbean-South American plate boundary zone. *Marine and Petroleum Geology* 28. Pp 8-39.
- Espartaco, A. (2017). Comparación de los procesos modeladores del relieve actual y sensibilidad de estos mecanismos por parte de los minerales pesados: aplicaciones a subcuencas que drenan el río Orinoco y el lago de Maracaibo. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Geólogo. P272
- Figueira, M. y Romero L. (2014). Estudio de la interacción entre clima relieve y tectónica a lo largo de zonas circundantes a los ríos San Carlos, Guache, y Capitaneio mediante comparación de índices de erosión y análisis de minerales pesados. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Geólogo. pp 71
- Fuentes, J. 2004. Análisis Morfométricos de cuencas. Caso de estudio del parque nacional Pico de Tancitaro. Instituto nacional de ecología.
- García, V., (2010). Modelado de las interacciones entre procesos de erosión y sedimentación fluvial y el crecimiento de estructuras neo tectónicas. Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires en el área Ciencias Geológicas. pp 80
- González de Juana, Clemente et al. (1980). Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Tomo I. FONINVES, Venezuela. pp 28
- González de Juana, Clemente et al. (1980). Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Tomo II. FONINVES, Venezuela.
- González de Juana, C. (1946). Estudios sobre aguas subterráneas en los Llanos de Venezuela. *Revista de Fomento*, Caracas, 8 (64), pp 9-59.
- Hackley, P.C., Urbani, F., Karlsen, A. y Garrity, C. (2005). Mapa Geológico de Venezuela. Open file 2005-1038. USGS, pp2.
- Hedberg, H. D. y Pyre, A. (1944). Stratigraphy of northeastern of Anzoátegui, Venezuela, *Am. Assoc. Petrol. Geol., Bull.*, 28(1), pp 1-28.

- Kalliokoski, J. (1965). Geología de la parte norte-central del Escudo de Guayana, Venezuela. Bol. Geol., Caracas, pp 29-104.
- Khanbabaei, Z., Karam, A. y Rostamizad, G. (2013). Studying of Relationships between the Fractal Dimension of the Drainage Basins and Some of Their Geomorphological Characteristics. International Journal of Geosciences, 2013, 4, 636-642. Fecha de consulta: 10 julio del 2016. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2013.43058>
- López, N. y Uzcátegui, M. (2014). “Comparación de dos sectores de la formación mesa mediante caracterización mineralógica, textural, geomorfológica y análisis de minerales pesados en el sector central de la cuenca del río Orinoco”. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Geólogo. P 150
- Mc Candless, G (1965). Reconocimiento geológico de la región noroccidental del Estado Bolívar. MMH.vol II 13, pp 25.
- Mckeown, F.A., y otros., (1807). Analysis of Stream – Profile Data and Inferred Tectonic Activity, Eastern Ozark, Mountains Region. US. Geological Survey Bulletin. pp12, 34, 36.
- Méndez, W., y Cartaya, S., (1998). Estudio de las características pedo-geomorfológicas de una secuencia de suelos a lo largo de un transepto topográfico, en el área de La Mesa La Tentación, estado Anzoátegui, Llanos Orientales de Venezuela. ESPACIO Y DESARROLLO, No 10, pp 8-26.
- Mendoza, V. (2005). Geología de Venezuela, Tomo II. Guayana, Los Andes y Sistema Montañoso del Caribe. UDO. Escuela de Ciencias de la Tierra. Ciudad Bolívar.
- Monteiro, K., Missura, R. y Correa, A. (2010) Application of the Hack index – or stream length – gradient index- to the Tracumhaen river watershed Pernambuco, Brazil. UNESP Geociencias, V29., N° 4. pp 533-539.
- Ortegado, O. (2012) Geología de la Formación Mesa, en la zona de Borbon, al Suroeste de Ciudad Bolívar, margen derecho del río Orinoco, Estado Bolívar. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Magister Scientiarum en Ciencias Geológicas, inédito. Pp 37-39
- Parnaud, F.; Gou, Y.; Pascual, J-C.; Truskowski, Gallango, O.; Passalacqua, H.; y Roure, F. (1995) Petroleum Geology of the Central Part of the Eastern Venezuelan Basin, in Petroleum Basins of South America, Editors, A.J.Tankard. R.Suarez, and H.J.Welsink, AAPG Memoir 62, pp 741-756.
- PDVSA-LÉXICO ESTRATIGRÁFICO (2010). Formación Mesa. <http://www.pdv.com/lexico/m40w.htm>. Consulta 5 de noviembre de 2013.

- Pratsch, J. (1994). The location of major oil- and gasfields: Examples from the Andean foreland. *Journal of Petroleum Geology*, vol. 17(3), pp 327-338.
- Ramírez, E. (1982). Estructuras Sedimentarias en el Paleozoico Inferior de la Cuenca Oriental de Venezuela, Interpretación Ambiental. Trabajo Especial de Reválida, Universidad Central de Venezuela, pp 85.
- Rocca, J. (2007) Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno. *Boletín del instituto de fisiografía y geología*. **77(1-2)**: 31-38. Rosario, 01-10-2007. pp 32
- Stanley, S. (1999). *Earth System History*. Nueva York: W. H. Freeman and Company, San Francisco, pp 615.
- Strahler, A.N. (1957). Quantitative analysis of watershed Geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union*. Vol 38.No 6.
- Thornthwaite, C. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, Vol. 38, No. 1, pp 55-94.
- Turcotte, D.L. (2007). *Fractal and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, P 398.
- Venimia. Portal de mapas y planos de Venezuela y el Mar Caribe. Fecha de consulta: 2013. <http://www.venemia.com/Master/MastIni.php>
- Vila, M. (1950). Las regiones naturales de Venezuela. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Filosofía y Letras. Caracas, Venezuela, pp145-148.
- Wilson, J. y Gallant, J. (2000). *Digital Terrain Analysis*. (eds), *Terrain Analysis: Principles and Applications*, New York :John Wiley and Sons: pp. 1 – 28.
- Willgoose, G., (2005) *Mathematical Modeling of Whole Landscape Evolution*. *Annual Review*. pp. 445
- Yoris, F.G., Ostos, M.; Boujana, M.; Pérez, J.; Booth, G.; Packer, S.; Galea, F. y Lander, R. (1997). Detailed Lithostratigraphy and Age Determinations of La Luna Formation in two sections of S.W. Táchira State (Venezuela). *AAPG Bull.*, 80 (8), pp 1346.
- Zinck, A. y Urriola, P. L. (1970). Origen y evolución de la Formación Mesa: un enfoque edafológico. Informe inédito, Ministerio de Obras Públicas, División de Edafología, Barcelona, pp 70.

## **APÉNDICES**

**Apéndice 1. Tablas utilizadas en el cálculo de las variables utilizadas para graficar la curva hipsométrica**

Apéndice 1.1 Tabla de cálculos de la Curva hipsométrica del río Aro

VALUE	AREA	MIN	MAX	promedio	Area acum	%area acum
1	256850549,8	13	44	28,5	15586981364	100
2	297425567,2	45	86	65,5	15330130814	98,3521469
3	1416695320	87	128	107,5	15032705247	96,4439804
4	1987279018	129	169	149	13616009927	87,3550151
5	1154230111	170	211	190,5	11628730910	74,6054072
6	1085877904	212	253	232,5	10474500799	67,2003164
7	5697094762	254	294	274	9388622895	60,2337468
8	2686527808	295	336	315,5	3691528133	23,6834063
9	671249284,9	337	378	357,5	1005000325	6,44769055
10	154212500,6	379	419	399	333751039,7	2,14121665
11	70204524,06	420	461	440,5	179538539,1	1,15184932
12	40468116,5	462	503	482,5	109334015	0,70144445
13	24126478,6	504	545	524,5	68865898,51	0,44181678
14	15357771,78	546	586	566	44739419,91	0,28703069
15	11227426,11	587	628	607,5	29381648,14	0,18850121
16	7678885,888	629	670	649,5	18154222,03	0,11647042
17	5050828,109	671	711	691	10475336,14	0,06720568
18	3357443,146	712	753	732,5	5424508,03	0,03480153
19	1367006,296	754	795	774,5	2067064,884	0,01326148
20	700058,5878	796	837	816,5	700058,5878	0,0044913

Apéndice 1.2 Tabla de cálculos de la Curva hipsométrica del río Caura

VALUE	AREA	MIN	MAX	promedio	area acum	%area acc
1	11805311043	10	126	68	28074833418	100
2	1457328272	127	242	184,5	16269522375	57,9505571
3	9949310770	243	358	300,5	14812194103	52,7596865
4	1305337483	359	475	417	4862883333	17,3211476
5	814513255,1	476	591	533,5	3557545850	12,6716544
6	591627272,8	592	707	649,5	2743032595	9,77043231
7	457472428,6	708	823	765,5	2151405322	7,66310984
8	393473700	824	940	882	1693932894	6,03363471
9	371204245,4	941	1056	998,5	1300459194	4,63211722
10	347468065,9	1057	1172	1114,5	929254948,5	3,3099215
11	254975826,4	1173	1288	1230,5	581786882,6	2,0722719
12	110156749,7	1289	1405	1347	326811056,2	1,16407122
13	52005872,02	1406	1521	1463,5	216654306,6	0,77170291
14	49017182,07	1522	1637	1579,5	164648434,5	0,58646273
15	51066787,16	1638	1753	1695,5	115631252,5	0,41186799
16	38156751,35	1754	1870	1812	64564465,32	0,22997275
17	13491963,65	1871	1986	1928,5	26407713,97	0,09406187
18	7305051,615	1987	2102	2044,5	12915750,32	0,04600473
19	4417318,043	2103	2218	2160,5	5610698,705	0,0199848
20	1193380,662	2219	2335	2277	1193380,662	0,00425071

Apéndice 1.3 Tabla de cálculos de la Curva hipsométrica del río Cuchivero

VALUE	AREA	MIN	MAX	promedio	area acum	%area acc
1	3994010262	21	123	72	15832047192	100
2	2312784181	124	226	175	11838036929	74,77262281
3	3349825143	227	329	278	9525252748	60,16437819
4	1973836737	330	432	381	6175427605	39,00586911
5	942296123,2	433	535	484	4201590868	26,5385191
6	765193736,6	536	638	587	3259294745	20,5866917
7	618642446,5	639	741	690	2494101008	15,75349655
8	450370726,8	742	844	793	1875458562	11,84596369
9	448567003,9	845	947	896	1425087835	9,001285921
10	356043017,3	948	1050	999	976520831	6,168001012
11	278052377,2	1051	1153	1102	620477813,7	3,919125595
12	189306523,7	1154	1256	1205	342425436,5	2,162862657
13	68085027,12	1257	1359	1308	153118912,8	0,967145379
14	49375596,9	1360	1462	1411	85033885,66	0,537099749
15	19118887,79	1463	1565	1514	35658288,76	0,22522854
16	9032998,443	1566	1668	1617	16539400,97	0,10446786
17	3748406,679	1669	1771	1720	7506402,528	0,047412709
18	2495102,118	1772	1874	1823	3757995,849	0,023736639
19	1020287,722	1875	1977	1926	1262893,731	0,007976819
20	242606,0091	1978	2080	2029	242606,0091	0,001532373

Apéndice 1.4 Tabla de cálculos de la Curva hipsométrica del río Pao

VALUE	AREA	MIN	MAX	promedio	area acum	%area acc
1	91656126,03	13	30	21,5	3201596601	100
2	97463296,35	31	47	39	3109940475	97,1371744
3	78032193,84	48	64	56	3012477178	94,0929653
4	91694007,12	65	81	73	2934444985	91,6556753
5	125249072,1	82	98	90	2842750977	88,7916665
6	152262073,8	99	115	107	2717501905	84,8795849
7	206973724,7	116	132	124	2565239831	80,123768
8	277996023,8	133	149	141	2358266107	73,6590645
9	318200166,3	150	166	158	2080270083	64,9760211
10	328253806,2	167	183	175	1762069917	55,0372247
11	348788195,3	184	200	192	1433816111	44,7844088
12	335498563,7	201	217	209	1085027915	33,8902132
13	284543769,3	218	234	226	749529352	23,4111115
14	184906098,7	235	251	243	464985582	14,5235531
15	125646823,5	252	268	260	280079483	8,74811909
16	66264434,81	269	285	277	154432660	4,82361394
17	42081150,2	286	302	294	88168225,1	2,75388302
18	28503622,34	303	319	311	46087074,9	1,43950287
19	16826777,92	320	336	328	17583452,6	0,54920887
20	756674,6712	337	354	345,5	756674,671	0,02363429

Apéndice 1.5 Tabla de cálculos de la Curva hipsométrica del río Manapire

VALUE	AREA	MIN	MAX	promedio	area acum	%area acc
1	476861120,9	17	35	26	9549602647	100
2	740572854	36	54	45	9072741526	95,0064821
3	637953567,9	55	73	64	8332168672	87,2514698
4	789817848	74	92	83	7694215104	80,5710498
5	997423820,6	93	110	101,5	6904397256	72,3003617
6	1430035344	111	129	120	5906973436	61,8556986
7	1658289724	130	148	139	4476938091	46,8808835
8	1416183513	149	167	158	2818648367	29,5158707
9	740911054,1	168	186	177	1402464854	14,6861069
10	321583223,8	187	205	196	661553800	6,92755316
11	155340171,9	206	223	214,5	339970576	3,56004945
12	99569737,16	224	242	233	184630404	1,93338311
13	54268174,99	243	261	252	85060667,3	0,89072468
14	22312581,03	262	280	271	30792492,3	0,32244789
15	5320183,883	281	299	290	8479911,32	0,08879858
16	1194718,045	300	317	308,5	3159727,44	0,03308753
17	724303,8026	318	336	327	1965009,39	0,02057687
18	428258,9944	337	355	346	1240705,59	0,01299222
19	708016,5478	356	374	365	812446,593	0,00850765
20	104430,0456	375	393	384	104430,046	0,00109355

Apéndice 1.6 Tabla de cálculos de la Curva hipsométrica del río Zuata

VALUE	AREA	MIN	MAX	promedio	area acum	%area acc
1	51215903,04	28	43	35,5	4621351815	100
2	150126313,2	44	58	51	4570135912	98,8917549
3	291030555,8	59	73	66	4420009599	95,6432182
4	496793025,6	74	89	81,5	4128979043	89,3456981
5	586772758,2	90	104	97	3632186018	78,5957478
6	653819756,1	105	119	112	3045413260	65,8987539
7	729288680	120	134	127	2391593504	51,7509508
8	744671769,7	135	150	142,5	1662304824	35,970099
9	428602285,9	151	165	158	917633054	19,8563773
10	221842245,4	166	180	173	489030768	10,5819853
11	107311454,7	181	195	188	267188523	5,78160965
12	68044568,52	196	211	203,5	159877068	3,45953033
13	42681026,56	212	226	219	91832499,4	1,987135
14	31671681,32	227	241	234	49151472,8	1,06357349
15	14453858,88	242	256	249	17479791,5	0,37823979
16	1581306,074	257	272	264,5	3025932,63	0,06547722
17	669160,1335	273	287	280	1444626,56	0,03125983
18	446106,7556	288	302	295	775466,424	0,01678008
19	235392,5009	303	317	310	329359,669	0,00712691
20	93967,16768	318	333	325,5	93967,1677	0,00203333



## Apéndice 2 Cálculos realizados en el Stream – Gradient Índice

### Apéndice 2.1 Stream – Gradient Índice río Aro

aro 324,5 km		delh 303,3						
	x	y	Xmax-Xmin	ymax-ymin	L	Slseccion	Sltotal	Slsecc/Sltot
1	320	323,3	20	39,3	24,5	48,14	94,82	0,51
2	300	284	20	13	44,5	28,93	79,91	0,36
3	280	271	20	5	64,5	16,13	72,79	0,22
4	260	266	20	7	84,5	29,58	68,36	0,43
5	240	259	20	3	104,5	15,68	65,24	0,24
6	220	256	20	2	124,5	12,45	62,87	0,20
7	200	254	20	10	144,5	72,25	60,99	1,18
8	180	244	20	10	164,5	82,25	59,44	1,38
9	160	234	20	12	184,5	110,70	58,13	1,90
10	140	222	20	115	204,5	1175,88	57,01	20,63
11	120	107	20	20	224,5	224,50	56,02	4,01
12	100	87	20	9	244,5	110,03	55,15	1,99
13	80	78	20	24	264,5	317,40	54,38	5,84
14	60	54	20	25	284,5	355,63	53,67	6,63
15	40	29	20	9	304,5	137,03	53,04	2,58
16	20	20	20	10	324,5	162,25	52,45	3,09

### Apéndice 2.2 Stream – Gradient Índice río Caura

caura 507,6		delh 1566						
	x	y	Xmax-Xmin	ymax-ymin	L	SL	Sltotal	anomalous
1	500	1563	20	1156	27,6	1595,28	472,00	3,3799
2	480	407	20	67	47,6	159,46	405,40	0,3933
3	460	340	20	24,3	67,6	82,13	371,65	0,2210
4	440	315,7	20	22,7	87,6	99,43	350,12	0,2840
5	420	293	20	19	107,6	102,22	334,73	0,3054
6	400	274	20	7	127,6	44,66	322,96	0,1383
7	380	267	20	3	147,6	22,14	313,54	0,0706
8	360	264	20	11	167,6	92,18	305,77	0,3015
9	340	253	40	21	207,6	108,99	293,50	0,3713
10	300	232	20	193	227,6	2196,34	288,53	7,6123
11	280	39	20	0	247,6	0,00	284,12	0,0000
12	260	39	20	0	267,6	0,00	280,17	0,0000
13	240	39	20	7	287,6	100,66	276,60	0,3639
14	220	32	20	0	307,6	0,00	273,36	0,0000
15	200	32	20	10	327,6	163,80	270,38	0,6058
16	180	22	20	0	347,6	0,00	267,64	0,0000
17	160	22	20	1	367,6	18,38	265,11	0,0693

Continuacion Apéndice 2.2 Stream – Gradient Índice río Caura								
18	140	21	20	7	387,6	135,66	262,75	0,5163
19	120	14	20	0	407,6	0,00	260,55	0,0000
20	100	14	20	0	427,6	0,00	258,49	0,0000
21	80	14	20	0	447,6	0,00	256,56	0,0000
22	60	14	20	10	467,6	233,80	254,73	0,9178
23	40	4	20	7	487,6	170,66	253,01	0,6745
24	20	-3	20	0	507,6	0,00	251,38	0,0000

### Apéndice 2.3 Stream – Gradient Índice río Cuchivero

cuchivero 244,4 km delth 234								
	x	y	Xmax-Xmin	ymax-ymin	L	SL	Sltotal	anomalous
1	240	251	20	75	24,4	91,50	73,25	1,249
2	220	176	20	64	44,4	142,08	61,69	2,303
3	200	112	20	62	64,4	199,64	56,18	3,554
4	180	50	20	1	84,4	4,22	52,76	0,080
5	160	49	20	7	104,4	36,54	50,34	0,726
6	140	42	20	4	124,4	24,88	48,51	0,513
7	120	38	20	1	144,4	7,22	47,06	0,153
8	100	37	20	3	164,4	24,66	45,86	0,538
9	80	34	20	1	184,4	9,22	44,85	0,206
10	60	33	20	9	204,4	91,98	43,98	2,091
11	40	24	20	0	224,4	0,00	43,23	0,000
12	20	24	20	7	244,4	85,54	42,55	2,010

### Apéndice 2.4 Stream – Gradient Índice río Manapire

manapire 245,6 km delth 195,7								
	x	y	xmax-xmin	ymax-ymin	L	SL	Sltotal	anomalous
1	240	239,7	20	41,7	25,6	53,38	60,35	0,88
2	220	198	20	35	45,6	79,80	51,23	1,56
3	200	163	20	24	65,6	78,72	46,78	1,68
4	180	139	20	16	85,6	68,48	43,98	1,56
5	160	123	20	13	105,6	68,64	42,00	1,63
6	140	110	20	13	125,6	81,64	40,49	2,02
7	120	97	20	9	145,6	65,52	39,29	1,67
8	100	88	20	10	165,6	82,80	38,30	2,16
9	80	78	20	8	185,6	74,24	37,46	1,98
10	60	70	20	10	205,6	102,80	36,74	2,80
11	40	60	20	4	225,6	45,12	36,12	1,25
12	20	56	20	12	245,6	147,36	35,56	4,14

Apéndice 2.5 Stream – Gradient Índice río Pao

pao 142,7 km		deth h 286,7						
	x	y	xmax-xmin	ymax-ymin	L	SL	Sltotal	anomalous
1	140	287,7	20	78	22,7	88,53	91,82	0,96
2	120	209,7	20	47	42,7	100,35	76,37	1,31
3	100	162,7	20	34,4	62,7	107,84	69,28	1,56
4	80	128,3	20	30,3	82,7	125,29	64,93	1,93
5	60	98	20	24,67	102,7	126,68	61,90	2,05
6	40	73,33	20	30,33	122,7	186,07	59,61	3,12
7	20	43	20	42	142,7	299,67	57,79	5,19

Apéndice 2.6 Stream – Gradient Índice río Zuata

zuata 163,8 km		delt h 177						
	x	y	xmax-xmin	ymax-ymin	L	SL	Sltotal	anomalous
1	160	207	20	63	23,8	74,97	55,84	1,34
2	140	144	20	28,3	43,8	61,98	46,83	1,32
3	120	115,7	20	20,7	63,8	66,03	42,59	1,55
4	100	95	20	20	83,8	83,80	39,97	2,10
5	80	75	20	11	103,8	57,09	38,13	1,50
6	60	64	20	12	123,8	74,28	36,73	2,02
7	40	52	20	13	143,8	93,47	35,62	2,62
8	20	39	20	9	163,8	73,71	34,72	2,12

### Apéndice 3 Tablas que resumen los cálculos de erosión y geometría fractal

Apéndice 3.1.1 Tabla de los cálculos de dimensión fractal del río Aro

GRID_CODE	Cnt_GRID_C	Sum_longit	Rb	RI	LnRb	LnRI	DF
1	45759	18935,8124	0,99997815	0,99994719	-2,18534E-05	-5,28086E-05	0,41382254
2	21538	9231,511429	0,99995357	0,99989169	-4,64285E-05	-0,000108319	0,42862834
3	11418	4602,554232	0,99991243	0,99978278	-8,75772E-05	-0,000217247	0,4031225
4	6043	2270,991447	0,99983455	0,99955986	-0,000165467	-0,000440239	0,37585694
5	2914	1060,642427	0,99965695	0,99905806	-0,000343112	-0,000942381	0,3640907
6	1355	481,7809052	0,99926254	0,99792867	-0,000737735	-0,002073481	0,35579547
7	653	240,2965143	0,99847095	0,99585572	-0,001530222	-0,00415289	0,36847164
8	463	175,4050665	0,99784483	0,99433123	-0,002157498	-0,0056849	0,37951383
9	256	100,490804	0,99610895	0,99014689	-0,00389864	-0,009901973	0,39372361

Apéndice 3.2 Tabla de los cálculos de dimensión fractal del río Caura

GRID_CODE	Cnt_GRID_C	Sum_longit	Rb	RI	LnRb	LnRI	DF
1	82461	35080,13359	0,99998787	0,99997149	-1,21269E-05	-2,85058E-05	0,42541833
2	38904	16719,81157	0,9999743	0,99994019	-2,5704E-05	-5,98075E-05	0,42977834
3	20852	8318,903717	0,99995205	0,99987981	-4,79559E-05	-0,000120201	0,39896433
4	10733	3945,923715	0,99990684	0,99974664	-9,31663E-05	-0,000253394	0,36767352
5	5259	1862,065129	0,99980989	0,99946325	-0,000190132	-0,000536894	0,35413349
6	2714	932,4592808	0,99963168	0,99892872	-0,000368392	-0,001071858	0,34369468
7	799	285,0335397	0,99875	0,99650391	-0,001250782	-0,003502219	0,35713982
8	834	321,5730353	0,9988024	0,99689993	-0,001198322	-0,003104888	0,38594705
9	438	204,5978455	0,9977221	0,99513614	-0,002280503	-0,004875731	0,46772526

Apéndice 3.3 Tabla de los cálculos de dimensión fractal del río Cuchivero

GRID_CODE	Cnt_GRID_C	Sum_longit	Rb	RI	LnRb	LnRI	DF
1	45153	19200,94931	0,99997785	0,99994792	-2,21467E-05	-5,20794E-05	0,4252483
2	21343	9352,046909	0,99995315	0,99989308	-4,68527E-05	-0,000106923	0,43819181
3	11054	4623,439616	0,99990954	0,99978376	-9,04609E-05	-0,000216266	0,41828573
4	5969	2349,587625	0,9998325	0,99957457	-0,000167518	-0,000425516	0,39368249
5	2829	1077,571341	0,99964664	0,99907285	-0,000353419	-0,000927582	0,38101123
6	1645	618,4492241	0,99939247	0,99838566	-0,000607718	-0,001615642	0,37614653
7	433	154,1001453	0,99769585	0,99355255	-0,002306806	-0,006468322	0,35663131
8	559	201,5996824	0,99821429	0,99506416	-0,001787311	-0,004948063	0,36121416
9	258	127,89539	0,996139	0,99224177	-0,003868477	-0,007788481	0,49669207

Apéndice 3.4 Tabla de los cálculos de dimensión fractal del río Pao

GRID_CODE	Cnt_GRID_C	Sum_longit	Rb	RI	LnRb	LnRI	dime fract
1	9534	4205,56226	0,99989512	0,99976228	-0,00010488	-0,00023775	0,44114135
2	4462	1993,588937	0,99977594	0,99949864	-0,00022409	-0,00050148	0,44685466
3	2457	962,1698073	0,99959317	0,99896176	-0,00040692	-0,00103878	0,39172726
4	1200	426,7513364	0,99916736	0,99766219	-0,00083299	-0,00234054	0,35589435
5	587	193,9165514	0,99829932	0,9948696	-0,00170213	-0,00514361	0,33092114
6	245	79,84168167	0,99593496	0,98763014	-0,00407333	-0,012447	0,32725359
7	135	46,2767369	0,99264706	0,97884795	-0,00738011	-0,02137896	0,34520419
8	203	80,58287228	0,99509804	0,98774253	-0,00491401	-0,01233322	0,39843738

Apéndice 3.5 Tabla de los cálculos de dimensión fractal del río Manapire

GRID_CODE	Cnt_GRID_C	Sum_longit	Rb	RI	LnRb	LnRI	dime fract
1	28236	12269,40774	0,99996459	0,9999185	-3,54152E-05	-8,15002E-05	0,43454067
2	13374	5966,188277	0,99992523	0,99983242	-7,47692E-05	-0,000167597	0,44612421
3	7051	2995,138724	0,9998582	0,99966624	-0,000141814	-0,000333819	0,4248229
4	3743	1512,769773	0,99973291	0,9993394	-0,00026713	-0,000660821	0,40423928
5	1573	620,0630869	0,99936468	0,99838986	-0,000635526	-0,00161144	0,39438384
6	995	403,0941811	0,99899598	0,99752533	-0,00100452	-0,002477738	0,40541839
7	235	96,11782475	0,99576271	0,98970323	-0,004246291	-0,010350149	0,41026373
8	172	69,60441666	0,99421965	0,98583658	-0,005797118	-0,014264678	0,40639666
9	373	164,1088294	0,9973262	0,99394339	-0,002677378	-0,006075027	0,44071867

Apéndice 3.6 Tabla de los cálculos de dimensión fractal del río Zuata

GRID_CODE	Cnt_GRID_C	Sum_longit	Rb	RI	LnRb	LnRI	dim fract
1	13955	5959,930654	0,99992835	0,99983224	-7,16563E-05	-0,00016777	0,42710262
2	6594	2839,739612	0,99984837	0,99964798	-0,000151642	-0,00035208	0,43069825
3	3708	1481,751953	0,99973039	0,99932558	-0,000269651	-0,00067465	0,39969042
4	1689	654,4823712	0,99940828	0,99847441	-0,000591891	-0,00152676	0,38767817
5	840	303,1909442	0,99881094	0,99671259	-0,001189768	-0,00329282	0,36132148
6	393	153,5307541	0,99746193	0,9935288	-0,002541297	-0,00649223	0,39143658
7	235	88,17315445	0,99576271	0,98878586	-0,004246291	-0,01127749	0,37652802
8	111	40,60584692	0,99107143	0,97596492	-0,00896867	-0,02432864	0,36864659

