

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN DE LOS PROCESOS CONTROLADORES DEL RELIEVE ACTUAL DE LAS CUENCAS DEL RÍO TÓCOME Y QUEBRADA MIGUELENA, MEDIANTE APLICACIONES DE LA DIMENSIÓN FRACTAL Y TÉCNICAS DE GEOMORFOLOGÍA CUANTITATIVA FLUVIAL

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela por la Br:
Guevara A. Mariam A.
Para optar al título de
Ingeniero Geólogo

Caracas, Noviembre 2017

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN DE LOS PROCESOS CONTROLADORES DEL RELIEVE ACTUAL DE LAS CUENCAS DEL RÍO TÓCOME Y QUEBRADA MIGUELENA, MEDIANTE APLICACIONES DE LA DIMENSIÓN FRACTAL Y TÉCNICAS DE GEOMORFOLOGÍA CUANTITATIVA FLUVIAL

TUTOR: Prof. Mauricio Bermúdez

COTUTOR: Prof. Rosa Jiménez

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela por la Br:
Guevara A. Mariam A.
Para optar al título de
Ingeniero Geólogo

Caracas, Noviembre 2017

Caracas, Noviembre de 2017

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geológica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Mariam Guevara, titulado:

“ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN DE LOS PROCESOS CONTROLADORES DEL RELIEVE ACTUAL DE LAS CUENCAS DEL RÍO TÓCOME Y QUEBRADA MIGUELENA, MEDIANTE APLICACIONES DE LA DIMENSIÓN FRACTAL Y TÉCNICAS DE GEOMORFOLOGÍA CUANTITATIVA FLUVIAL”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geólogo, sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.

Jurado

Jurado

Tutor

Cotutor

DEDICATORIA

...A mis padres Myriam de Guevara y Herman Guevara[†] quienes fueron mi empuje e inspiración para salir adelante y culminar mi carrera de una manera satisfactoria, siempre guiándome y recalcando los principios y valores con los cuales me formaron, por siempre estar incondicionalmente y tener su apoyo en toda mi carrera. Aunque mi papito no está hoy en día presente, sé que donde estés estarás orgulloso y celebrando nuestro logro, te extraño.

...A mi esposo Javier Rodriguez por siempre darme ánimos y tener su apoyo incondicional aún en los peores

momentos, parte de este logro también es
tuyo. Es apenas el comienzo de muchos
éxitos que vendrán de ahora en adelante
para nosotros.

AGRADECIMIENTOS

A Dios todopoderoso y a la Santísima Virgen del Valle por darme salud, fuerza, sabiduría y fe para poder culminar mi carrera con éxito a pesar de todos los tropiezos vividos en el camino y poder mantenerme firme en lograr mi sueño.

A la Universidad Central de Venezuela, “La Casa que Vence la Sombra”, la cual considero como mi segunda casa, en especial a la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, por formarme como Ingeniero Geólogo y por todas las vivencias y amistades que encontré allí. También a los profesores que integran el departamento de geología, Ricardo Alezones, Enzo Caraballo, Lenín González, Rafael Falcón, Marlene Flores, Rosa Jiménez entre otros, gracias por formarme y darme las herramientas necesarias para ser una excelente profesional.

A mis hermanas, Myriam Guevara y Mayerling Guevara, por estar siempre presentes en cada momento y tener su apoyo incondicional.

Al Dr. Mauricio Bermúdez (tutor académico) por brindarme todo su apoyo, experiencia y conocimiento en todo momento cuando necesite de su ayuda, a pesar de los altibajos que se nos presentó en el camino. Gracias por confiar en mí.

A mi amiga e ingeniero Michelle Martínez por haber compartido muchos momentos durante la carrera y así formar esa amistad que tenemos hoy en día, por su colaboración y por siempre estar dispuesta a ayudarme en todo momento.

A mis amigos de Geología, Franyelis Crespo, Paola Letta, José Miguel Luna, Nelly Morales, Osberth Gamero, Kelly Pérez, William Martinez y Melissa, lo cual la vida me permitió conocer a estas grandes personas y estuvieron presente en las buenas y no tan buenas, siempre dando un consejo o ayuda cuando lo necesite. Y a todas aquellas amistades que de una u otra forma aportaron algo para mi formación como Ingeniero Geólogo, mil gracias.

Guevara A. Mariam A.

**ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN DE LOS PROCESOS
CONTROLADORES DEL RELIEVE ACTUAL DE LAS CUENCAS
DEL RÍO TÓCOME Y QUEBRADA MIGUELENA, MEDIANTE
APLICACIONES DE LA DIMENSIÓN FRACTAL Y TÉCNICAS DE
GEOMORFOLOGÍA CUANTITATIVA FLUVIAL**

**Tutor académico: Prof. Mauricio Bermúdez. Cotutor: Prof. Rosa Jiménez. Tesis.
Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica.
2017, páginas en total (111 páginas + 53 páginas de anexos).**

**Palabras claves: Tócome, Miguelena, Geomorfología, Erosión, Atributos,
Dimensión fractal.**

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realizó una comparación en términos cuantitativos de las principales características geomorfológicas de las cuencas de los ríos Tócome y Miguelena, con la finalidad de determinar la posible interacción entre clima y tectónica, y discriminar la influencia de estos procesos sobre el relieve actual del sector central de la Cordillera de La Costa. Para dicho estudio se estimaron diferentes parámetros geomorfológicos fluviales cuantitativos a partir de la integración de varias bases de datos (modelos de elevación digital, datos de precipitación, mapa geológico-estructural y datos de sismicidad histórica-actual, entre otros). Adicionalmente se comparó el contenido mineralógico presentes en los sedimentos de ambos ríos, a través de la identificación y análisis morfotexturales de los minerales pesados de cuatro muestras (MG002 a MG005) presentes en los sedimentos modernos. Para la identificación de los minerales pesados se empleó microscopía óptica, y se analizó la morfometría de los mismos mediante herramientas del análisis digital de imágenes (Image J).

De las distintas medidas geomorfométricas se calcularon para cada cuenca como atributos de primer orden: área, perímetro, longitud, ancho, diámetro, integral hipsométrica (HI), elongación, factor de forma y compacidad, elevación, pendiente, precipitación con el programa ArcGis 10.2 y dimensión fractal con el programa Matlab. Como atributos secundarios se obtuvieron: relieve, poder total de flujo (TSP), poder unitario de flujo (USP), poder de cizalla (SSP), índice de humedad (IH), capacidad de transporte de sedimentos (CTS), e índice de humedad (WI). Los resultados sugieren diferencias entre ambas cuencas, sin embargo, fue necesario extender el estudio cuantitativo a otras cuencas adyacentes a las de interés en ambos flancos. A nivel mineralógico, entre las cuencas Miguelena y Chorros se encontraron minerales con una abundancia similar, como: Muscovita, Estauroilita, Óxidos, Topacio, Desconocido, Andalucita, Ilmenita, Hornblenda, Cuarzo Turmalina, Monacita, Dolomita, y Piemonite, sin embargo, existe variación en algunos minerales, que sólo se encontraron en la Cuenca Miguelena, como lo son: Apatito, Augita y Limonita, y en la Cuenca Chorros: Hematita, Axinita, Circón, Enstatita, Lawsonita, Granate, Egirina, Glaucofano, Serpentina, Calcita, Anhidrita, Olivino, Zoisita, Clinozoisita, Barita. Minerales como el Hiperesteno y la Sillimanita se encontraron en ambas cuencas, pero en mayor cantidad en Miguelena y Rutilo en los Chorros. Los minerales presentes en las cuencas estudiadas provienen de 6 posibles fuentes, 3 principales: grupo 1 (ígneas ácidas), grupo 2 (pegmatitas graníticas), grupo 3 (ígneas ácidas) y grupo 4 (metamorfismo de contacto), grupo 5 (metamorfismo dinamotérmico), grupo 6 (gneises y esquisto). Seguido a esto, el estudio de redondez y esfericidad arrojaron valores muy similares con un promedio entre 0,6 y 0,7, dichos granos están sub —redondeados, esto quiere decir que son resultado de varios ciclos de transportes o de abrasión intensa.

El análisis geomorfológico cuantitativo indica que el paisaje de ambas cuencas (Los Chorros y Miguelena) se encuentran en fase de madurez, es decir, han sido sometidos a procesos erosivos similares a lo largo del tiempo. Análogamente, los valores de dimensión fractal para ambas cuencas, son muy similares lo que indicaría que los procesos que controlan el paisaje actual podrían ser los mismos para ambas cuencas. Esto mismo ocurre cuando se extiende el análisis a otras cuencas adyacentes sobre ambos flancos. El agente controlador del relieve actual de ambas cuencas es el climático (precipitaciones).

ÍNDICE

CAPÍTULO I	1
PRELIMINARES.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. GENERALIDADES Y UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	3
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.4. OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	6
1.4.1. Objetivo General	6
1.4.2. Objetivos Específicos	6
1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	7
1.6. ANTECEDENTES.....	7
1.6.1. Metodológicos	7
1.6.2. Estudios geológicos previos.....	10
CAPÍTULO II	14
MARCO GEOLÓGICO	14
2.1. INTRODUCCIÓN	14
2.2. GEOLOGÍA REGIONAL	14
2.3. GEOLOGÍA LOCAL	16
2.4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	21
CAPÍTULO III	23
MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO	23
3.1 INTRODUCCIÓN	23
3.2. MARCO TEÓRICO	24
3.1.1. La erosión	24
3.1.2. Factores que influyen en la respuesta hidrológica de una cuenca.....	25
3.1.3 Sistema fluvial, y estudio de la relación clima-relieve-tectónica.....	28
3.1.4. Geomorfología cuantitativa.....	30
3.1.5 Procesador de Imágenes (Image J)	38
3.3. MARCO METODOLÓGICO	39
3.3.1 Pre campo.....	40
3.3.2 Campo.....	40

3.3.3 Laboratorio y oficina.....	42
Separación de minerales pesados en el Laboratorio de Termocronología de la UCV.....	42
Elaboración de secciones montadas e identificación mineralógica mediante el Microscopio Petrográfico.	52
Análisis de la forma (redondez y esfericidad) de los granos	53
Aplicación de Geomorfología Cuantitativa.....	55
CAPÍTULO IV	56
RESULTADOS.....	56
4.1 INTRODUCCIÓN	56
4.2 LABORATORIO Y OFICINA	56
Identificación mineralógica mediante el Microscopio Petrográfico.....	56
Análisis de la forma (redondez y esfericidad) de los granos	63
Aplicación de Geomorfología Cuantitativa.....	66
CAPÍTULO V.....	78
DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	78
5.1 Introducción	78
5.2 Discriminación de los Procesos Controladores del Paisaje Actual de las cuencas en estudio	78
5.3 Discriminación de agentes controladores del relieve mediante correlaciones	86
5.3.1 FLANCO NORTE.....	89
5.3.2 FLANCO SUR	93
5.3.3 AMBOS FLANCOS.....	97
5.4 Comparación de ambos flancos en términos de la dimensión fractal (DF).....	100
CAPÍTULO VI	103
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	103
REFERENCIAS	107
ANEXOS	Error! Bookmark not defined.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio y principales formaciones geológicas que la conforman (Tomado y modificado de Hackley et al, 2005).	3
Figura 2. Asociaciones ígneo-metamórficas presentes a lo largo de la Quebrada Miguelena (Tomado y modificado de Urbani, 2002; Cano y Melo, 2002).	15
Figura 3. Ubicación de la zona de estudio y principales formaciones geológicas que la conforman. (Tomado y modificado de Hackley et al., 2005).	16
Figura 4. Mapa Geológico de la zona de estudio y posición del metagranito de Naiguatá. (Tomado de PDVSA Léxico).	21
Figura 5. A) Principales rocas y asociaciones presentes en el área de estudio. B) Esquema de bloques tectónicos presentes en la Cordillera de la Costa (Tomado de Urbani, 2002).	22
Figura 6. Representación simplificada de un sistema fluvial (Tomado de Charlton, 2008).	29
Figura 7. Metodología a emplear durante el desarrollo del Trabajo Especial de Grado.	39
Figura 8. Muestras de sedimentos no consolidados.	41
Figura 9. Algunas rocas de muestras de rocas in-situ recolectadas (MG001 izq. y MG006 der).	41
Figura 10. Diagrama de flujo que muestra el procesamiento de las muestras en el Laboratorio de Termocronología (Extraído Flores y Méndez, 2005).	42
Figura 11. Procesamiento de Muestras mediante una Trituradora de Mandíbulas.	43
Figura 12. Procesamiento de Muestras mediante una Trituradora de Cilindros.	43
Figura 13. Tratamiento de muestras mediante una Tamizadora.	44
Figura 14. Concentración de minerales mediante el empleo de la Mesa Wilfley.	44
Figura 15. Procesamiento de la muestra mediante el Separador Magnético Magnet Lift. Laboratorio de Termocronología UCV.	45
Figura 16. Material utilizado para la separación de minerales pesados y livianos con el Bromoformo	45
Figura 17. Procedimiento previo a la concentración de minerales por líquidos pesados. (Tomado de Martínez y Materano, 2016)	47
Figura 18. Concentración de minerales por líquidos pesados bromoformo o tetrabromuro, minerales pesados con densidad específica $\geq 2,89 \text{ grs/cm}^3$. (Figuras (b) y (c) tomada de Flores y Méndez, 2005).	50
Figura 19. Precipitación del alcohol absoluto en agua destilada y separación por densidad del bromoformo o tetrabromuro. (Tomado de Martínez y Materano, 2016).	51

Figura 20. Separador Isodinámico Frantz. Laboratorio de Termocronología. UCV.	52
Figura 21. Elaboración de secciones montadas.	53
Figura 22. Secciones montadas con su respectiva identificación.	53
Figura 23. Procedimiento aplicado en cada grano, mediante el programa Image J, para la obtención de los valores de redondez y esfericidad.	54
Figura 24. Minerales pesados presentes en la fracción magnética a 0,6 amperes en las muestras MG002, MG003, MG004 y MG005.	57
Figura 25. Otros minerales pesados presentes en la fracción magnética s 0,6 amperes en las muestras MG002, MG003, MG004 y MG005.	58
Figura 26. Minerales pesados presentes en la fracción magnética a 0,8 amperes en las muestras MG002, MG003, MG004 y MG005	59
Figura 27. Otros minerales pesados presentes en la fracción magnética a 0,8 amperes en las muestras MG002, MG003, MG004 y MG005	60
Figura 28. Minerales pesados presentes en la fracción magnética a 1,0 amperes en las muestras MG002, MG003, MG004 y MG005	61
Figura 29. Otros minerales pesados presentes en la fracción magnética a 1,0 amperes en las muestras MG002, MG003, MG004 y MG005	62
Figura 30. Valores promedios de redondez y esfericidad de forma visual y mediante el programa ImageJ, de las muestras MG002 y MG003 con sus fracciones AMP 0,6, AMP 0,8 y AMP 1,0.	64
Figura 31. Valores promedios de redondez y esfericidad de forma visual y mediante el programa ImageJ, de las muestras MG004 y MG005 con sus fracciones AMP 0,6, AMP 0,8 y AMP 1,0.	65
Figura 32. Valor del Área (m^2) de las cuencas Chorros y Miguelena.	67
Figura 33. Valor del Perímetro, Longitud, Ancho y Diámetro (m) de las cuencas Chorros y Miguelena.....	67
Figura 34. Valores de Hi, Elongación, Factor de forma y Compacidad de las cuencas Chorros y Miguelena.....	68
Figura 35. Valor de la Elevación (m) de las cuencas Chorros y Miguelena con su respectiva desviación estándar.....	69
Figura 36. Valor de la Pendiente (°) de las cuencas Chorros y Miguelena con su respectiva desviación estándar.....	69
Figura 37. Red hidrográfica de la Cuenca Chorros.	71
Figura 38. Red hidrográfica de la Cuenca Miguelena.	71

Figura 39. Cálculo de la Dimensión fractal de la Cuenca Chorros.....	73
Figura 40. Cálculo de la Dimensión fractal de la Cuenca Miguelena.	73
Figura 41. Valor del Relieve 1 km de radio para las cuencas Chorros y Miguelena con su respectiva desviación estándar (km).	74
Figura 42. Valor del relieve a un radio de 3 k de las cuencas Chorros y Miguelena con su respectiva desviación estándar.	75
Figura 43. Valor del relieve a un radio de 5 km de las cuencas Chorros y Miguelena con su respectiva desviación estándar.	75
Figura 44. Valor del relieve a un radio de 7 km de las cuencas Chorros y Miguelena con su respectiva desviación estándar	75
Figura 45. Comparación entre curvas hipsométricas para Los Chorros (roja) y río Miguelena (azul). Sobre ambas curvas hipsométricas se aplicó un análisis de regresión polinomial con la finalidad de mostrar la diferencia no sólo en términos del área bajo la curva sino también en la forma de las mismas.....	77
Figura 46. Mapa de unidades geológicas de la zona de estudio (Hackley et al., 2006).....	79
Figura 47. Sismicidad entre 1911 a 2011, energía sísmica y fallas existentes en el bloque central de la Cordillera de la Costa.....	80
Figura 48. Mapa del Logaritmo de la Energía Sísmica liberada para el período 1911 a 2011(calculada en este trabajo), se prefirió dejar la escala en logaritmos para poder establecer diferencias entre ambos flancos.....	80
Figura 49. Mapa de Precipitación en la zona. Modelo TRMM 1998-2009 (Bookhagen, 2010).	81
Figura 50. Mapa de los Índices de Humedad con precipitación (IHP) de la zona	81
Figura 51. Mapa de Elevación de la zona.	82
Figura 52. Mapa de Pendientes (°) de la zona.	83
Figura 53. Mapa del Potencial total de flujo (m ²): a) generalizado (TSP). b) con precipitación (TSPP) en la zona.....	83
Figura 54. Mapa del Poder unitario de la corriente (m ²): a) generalizado (USP). b) con precipitación (USPP) en la zona.....	84
Figura 55. Mapa del Poder de cizalla de la corriente (m ²): a) generalizado (SSP). b) con precipitación (SSPP) en la zona.....	84
Figura 56. Mapa de los índices de la Capacidad de transporte de sedimentos a) generalizado (CTS). b) con precipitación (CTSP) de la zona.....	85
Figura 57. Mapa del Poder de cizalla de la corriente con precipitación y fallas presentes en la zona, junto con la distribución de minerales pesados en tales cuencas.....	86

Figura 58. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 1km y precipitaciones para el período (1998-2009) para el flanco norte	89
Figura 59. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 7km y precipitaciones para el período (1998-2009) para el flanco norte	89
Figura 60. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 1 km y SSPP para el flanco norte	90
Figura 61. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 7km y SSPP para el flanco norte	90
Figura 62. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 1km y energía sísmica liberada para el flanco norte	91
Figura 63. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 7km y energía sísmica liberada para el flanco norte	91
Figura 64. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 1km y precipitaciones para el período (1998-2009) para el flanco sur	93
Figura 65. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 7km y precipitaciones para el período (1998-2009) para el flanco sur	93
Figura 66. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 1 km y SSPP para el flanco sur	94
Figura 67. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 7km y SSPP para el flanco sur	94
Figura 68. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 1km y energía sísmica liberada para el flanco sur.....	95
Figura 69. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 7km y energía sísmica liberada para el flanco sur.....	95
Figura 70. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 1km y precipitaciones para el período (1998-2009) para ambos flancos	97
Figura 71. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 7km y precipitaciones para el período (1998-2009) para ambos flancos	97
Figura 72. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 1 km y SSPP para ambos flancos	98
Figura 73. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 7km y SSPP para ambos flancos	98
Figura 74. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 1km y energía sísmica liberada para ambos flancos.....	99
Figura 75. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 7km y energía sísmica liberada para ambos flancos.....	99
Figura 76. Comparación de valores calculados de la dimensión fractal para las cuencas situadas en ambos flancos.....	101
Figura 77. Minerales identificados en la muestra MG002 AMP 0,6 (52 granos) mediante el Microscopio Petrográfico.	Error! Bookmark not defined.

- Figura 78.** *Minerales identificados en la muestra MG002 AMP 0,8 (50 granos) mediante el Microscopio Petrográfico. Error! Bookmark not defined.*
- Figura 79.** *Minerales identificados en la muestra MG002 AMP 1,0 (50 granos) mediante el Microscopio Petrográfico. Error! Bookmark not defined.*
- Figura 80.** *Minerales identificados en la muestra MG003 AMP 0,6 (52 granos) mediante el Microscopio Petrográfico. Error! Bookmark not defined.*
- Figura 81.** *Minerales identificados en la muestra MG003 AMP 0,8 (52 granos) mediante el Microscopio Petrográfico. Error! Bookmark not defined.*
- Figura 82.** *Minerales identificados en la muestra MG003 AMP 1,0 (52 granos) mediante el Microscopio Petrográfico. Error! Bookmark not defined.*
- Figura 83.** *Minerales identificados en la muestra MG004 AMP 0,6 (52 granos) mediante el Microscopio Petrográfico. Error! Bookmark not defined.*
- Figura 84.** *Minerales identificados en la muestra MG004 AMP 0,8 (52 granos) mediante el Microscopio Petrográfico. Error! Bookmark not defined.*
- Figura 85.** *Minerales identificados en la muestra MG004 AMP 1,0 (52 granos) mediante el Microscopio Petrográfico. Error! Bookmark not defined.*
- Figura 86.** *Minerales identificados en la muestra MG005 AMP 0,6 (51 granos) mediante el Microscopio Petrográfico. Error! Bookmark not defined.*
- Figura 87.** *Minerales identificados en la muestra MG005 AMP 0,8 (52 granos) mediante el Microscopio Petrográfico. Error! Bookmark not defined.*
- Figura 88.** *Minerales identificados en la muestra MG005 AMP 1,0 (50 granos) mediante el Microscopio Petrográfico Error! Bookmark not defined.*
- Figura 89.** *Fotografías de algunos granos de la muestra MG002 AMP 0,6 con su respectiva imagen arrojada por el programa Image J. Error! Bookmark not defined.*
- Figura 90.** *Fotografías de algunos granos de la muestra MG002 AMP 0,8 con su respectiva imagen arrojada por el programa Image J. Error! Bookmark not defined.*
- Figura 91.** *Fotografías de algunos granos de la muestra MG002 AMP 1,0 con su respectiva imagen arrojada por el programa Image J. Error! Bookmark not defined.*
- Figura 92.** *Fotografías de algunos granos de la muestra MG003 AMP 0,6 con su respectiva imagen arrojada por el programa Image J. Error! Bookmark not defined.*
- Figura 93.** *Fotografías de algunos granos de la muestra MG003 AMP 0,8 con su respectiva imagen arrojada por el programa Image J. Error! Bookmark not defined.*
- Figura 94.** *Fotografías de algunos granos de la muestra MG003 AMP 1,0 con su respectiva imagen arrojada por el programa Image J. Error! Bookmark not defined.*
- Figura 95.** *Fotografías de algunos granos de la muestra MG004 AMP 0,6 con su respectiva imagen arrojada por el programa Image J. Error! Bookmark not defined.*

Figura 96. Fotografías de algunos granos de la muestra MG004 AMP 0,8 con su respectiva imagen arrojada por el programa Image J..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 97. Fotografías de algunos granos de la muestra MG004 AMP 1,0 con su respectiva imagen arrojada por el programa Image J..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 98. Fotografías de algunos granos de la muestra MG005 AMP 0,6 con su respectiva imagen arrojada por el programa Image J..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 99. Fotografías de algunos granos de la muestra MG005 AMP 0,8 con su respectiva imagen arrojada por el programa Image J..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 100. Fotografías de algunos granos de la muestra MG005 AMP 1,0 con su respectiva imagen arrojada por el programa Image J..... **Error! Bookmark not defined.**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Formaciones que atraviesan cada una de las cuencas a estudiar	17
Tabla 2. Parámetros, ecuaciones y dimensión de las diversas variables a determinar en el presente estudio. Tomado y Modificado de Flores 2013 (Tomado de Gardiner, 1981; Gregory y Walling, 1973; Guevara y Cartaya, 1991; Henao, 1998; Horton, 1945; Leopold et al., 1964; Monsalve, 2000; Pastrana, 2003; Pérez, 1977; Senciales, 1998; Smith y Stopp, 1978; Strahler, 1968).	33
Tabla 3. Atributos topográficos secundarios que puede ser calculado mediante el análisis digital del terreno a partir del modelo de elevación digital (MED) (Tomado de Moore, Grayson y Ladson, 1991).	33
Tabla 4. Ubicación de las muestras recolectadas en el campo.	40
Tabla 5. Valores promedios de redondez y esfericidad, de forma visual y mediante el programa ImageJ de las muestras MG002, MG003, MG004, MG005 y sus fracciones magnéticas AMP 0,6, 0,8 y 1,0.....	63
Tabla 6. Valores del Área, Perímetro, Longitud, Ancho y Diámetro (m) de las cuencas Chorros y Miguelena.....	66
Tabla 7. Valores de H_i , Elongación, Factor de forma y Compacidad de las cuencas Chorros y Miguelena.....	68
Tabla 8. Valores de la Elevación (m) de la zona.	68
Tabla 9. Valores de Pendiente ($^{\circ}$) de la zona.....	69
Tabla 10. Valores del Precipitación en la zona.	70
Tabla 11. Valores de la Dimensión fractal en la zona.	71
Tabla 12. Valores del relieve de la zona considerando 0.5, 1, 3, 5 y 7 km de radio.....	74
Tabla 13. Valores del Potencial total de flujo (Joules/Km ²): a) generalizado (TSP). b) con precipitación (TSPP) en la zona.	76
Tabla 14. Valores del Poder unitario de la corriente (Joules/Km ²): a) generalizado (USP). b) con precipitación (USPP) en la zona.	76
Tabla 15. Valores del poder de cizalla de la corriente (Joules/Km ²): a) generalizado (SSP). b) con precipitación (SSPP) en la zona.....	76
Tabla 16. Índices de Humedad: a) generalizado (IH). b) con precipitación (IHP) de la zona.....	76
Tabla 17. Índices de la Capacidad de transporte de sedimentos: a) generalizado (CTS). b) con precipitación (CTSP) de la zona.	76
Tabla 18. Atributos primarios y secundarios promedios (parámetros geomorfológicos cuantitativos) para las cuencas ubicadas en los flancos norte y sur. Todos los índices de	

erosión con precipitación fueron calculados asumiendo la precipitación en metros para no y posteriormente fueron normalizados.....	88
Tabla 19. Correlaciones entre diversas variables geomorfológicas cuantitativas para el flanco Norte del área de estudio	92
Tabla 20. Correlaciones entre diversas variables geomorfológicas cuantitativas para el flanco Sur del área de estudio.....	96
Tabla 21. Valores de dimensión fractal (DF) y errores asociados para las cuencas del flanco norte y sur (ver Figura 47 para la ubicación de las cuencas).	100
Tabla 22 . Correlaciones entre diversas variables geomorfológicas cuantitativas para el bloque tectónico Naiguatá	102
Tabla 23. Minerales identificados en la muestra MG002 AMP 0,6 (52 granos) y sus respectivas características.	Error! Bookmark not defined.
Tabla 24. Minerales identificados en la muestra MG002 AMP 0,8 (50 granos) y sus respectivas características.	Error! Bookmark not defined.
Tabla 25. Minerales identificados en la muestra MG002 AMP 1,0 (50 granos) y sus respectivas características.	Error! Bookmark not defined.
Tabla 26. Minerales identificados en la muestra MG003 AMP 0,6 (52 granos) y sus respectivas características.	Error! Bookmark not defined.
Tabla 27. Minerales identificados en la muestra MG003 AMP 0,8 (52 granos) y sus respectivas características.	Error! Bookmark not defined.
Tabla 28. Minerales identificados en la muestra MG003 AMP 1,0 (52 granos) y sus respectivas características.	Error! Bookmark not defined.
Tabla 29. Minerales identificados en la muestra MG004 AMP 0,6 (52 granos) y sus respectivas características.	Error! Bookmark not defined.
Tabla 30. Minerales identificados en la muestra MG004 AMP 0,8 (52 granos) y sus respectivas características.	Error! Bookmark not defined.
Tabla 31. Minerales identificados en la muestra MG 004 AMP 1,0 (52 granos) y sus respectivas características.	Error! Bookmark not defined.
Tabla 32. Minerales identificados en la muestra MG005 AMP 0,6 (51 granos) y sus respectivas características.	Error! Bookmark not defined.
Tabla 33. Minerales identificados en la muestra MG005 AMP 0,8 (52 granos) y sus respectivas características.	Error! Bookmark not defined.
Tabla 34. Minerales identificados en la muestra MG 005 AMP 1,0 (50 granos) y sus respectivas características.	Error! Bookmark not defined.
Tabla 35. Valores de redondez y esfericidad de forma visual y mediante el programa ImageJ de la muestra MG002 AMP 0,6.	Error! Bookmark not defined.

Tabla 36. Valores de redondez y esfericidad de forma visual y mediante el programa ImageJ de la muestra MG002 AMP 0,8..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabla 37. Valores de redondez y esfericidad de forma visual y mediante el programa Image J de la muestra MG002 AMP 1,0..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabla 38. Valores de redondez y esfericidad de forma visual y mediante el programa ImageJ de la muestra MG003 AMP 0,6..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabla 39. Valores de redondez y esfericidad de forma visual y mediante el programa ImageJ de la muestra MG003 AMP 0,8..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabla 40. Valores de redondez y esfericidad de forma visual y mediante el programa ImageJ de la muestra MG 003 AMP 1,0..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabla 41. Valores de redondez y esfericidad de forma visual y mediante el programa ImageJ de la muestra MG004 AMP 0,6..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabla 42. Valores de redondez y esfericidad de forma visual y mediante el programa ImageJ de la muestra MG004 AMP 0,8..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabla 43. Valores de redondez y esfericidad de forma visual y mediante el programa ImageJ de la muestra MG004 AMP 1,0..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabla 44. Valores de redondez y esfericidad de forma visual y mediante el programa ImageJ de la muestra MG005 AMP 0,6..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabla 45. Valores de redondez y esfericidad de forma visual y mediante el programa ImageJ de la muestra MG 005 AMP 0,8..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabla 46. Valores de redondez y esfericidad de forma visual y mediante el programa ImageJ de la muestra MG 005 AMP 1,0..... **Error! Bookmark not defined.**

CAPÍTULO I

PRELIMINARES

1.1. INTRODUCCIÓN

Desde 1845 hasta nuestros días existe una amplia discusión para tratar de explicar el posible origen de la Cordillera de La Costa (Urbani, 2009), la gran diversidad de modelos se debe principalmente a que este orógeno se encuentra en el límite sur de la Placa del Caribe, cuyo origen e interacción con la Placa Suramericana aún es motivo de estudio. A partir del año 1999, fecha en la cual ocurrió un evento climático catastrófico (conocido como la "Vaguada de Vargas"; Escobar, 2009) que acabó con la vida de numerosas personas en la Cordillera de La Costa, el estudio de los flujos torrenciales, grandes movimientos en masa y su impacto sobre comunidades ha venido incrementándose significativamente. Adicionalmente, hoy en día muy poco se conoce sobre la actividad tectónica actual de la Cordillera de La Costa, y mucho menos si existe o no una posible relación entre el clima y la tectónica en esta cadena montañosa.

Por tal motivo, en la presente investigación se plantea hacer un estudio comparativo en ambos flancos de la Cordillera de La Costa donde existen las mayores elevaciones (Pico Naiguatá y Silla de Caracas), las dos zonas seleccionadas para este estudio son las cuencas de los ríos Tócome y Miguelena.

Partiendo de la ubicación geográfica e importancia histórica de estas quebradas, es objeto fundamental de estudio tratar de extraer la mayor información acerca de los posibles controles climáticos o tectónicos sobre el paisaje alrededor de las cuencas de los ríos antes mencionados. Así, se plantea como objetivo principal de esta investigación, realizar una comparación en términos cuantitativos de las

principales características geomorfológicas y de las tasas de erosión de ambos ríos con la finalidad de determinar la posible interacción entre clima, tectónica e influencia de la erosión sobre el sector central de la Cordillera de La Costa.

El presente estudio se constituye de cuatro capítulos los cuales se distribuyen de la siguiente manera: Capítulo I, consta de información preliminar y relevante, presenta la zona de estudio, los objetivos planteados, la justificación e importancia del trabajo y algunos antecedentes tanto metodológicos como estudios geológicos previos.

El Capítulo II da a conocer el marco geológico de la zona de estudio, esto consta de una geología regional, local y el aspecto estructural.

El Capítulo III presenta información complementaria que facilita la comprensión de algunas definiciones, además explica todos los procesos, procedimientos, pasos y metodologías a seguir para la obtención de resultados, los cuales se presentan de manera organizada en el Capítulo IV.

En el Capítulo V se realiza un análisis completo de los resultados obtenidos, todo esto permite realizar las respectivas conclusiones a los objetivos planteados, y finalmente se presentan en el Capítulo VI.

1.2. GENERALIDADES Y UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

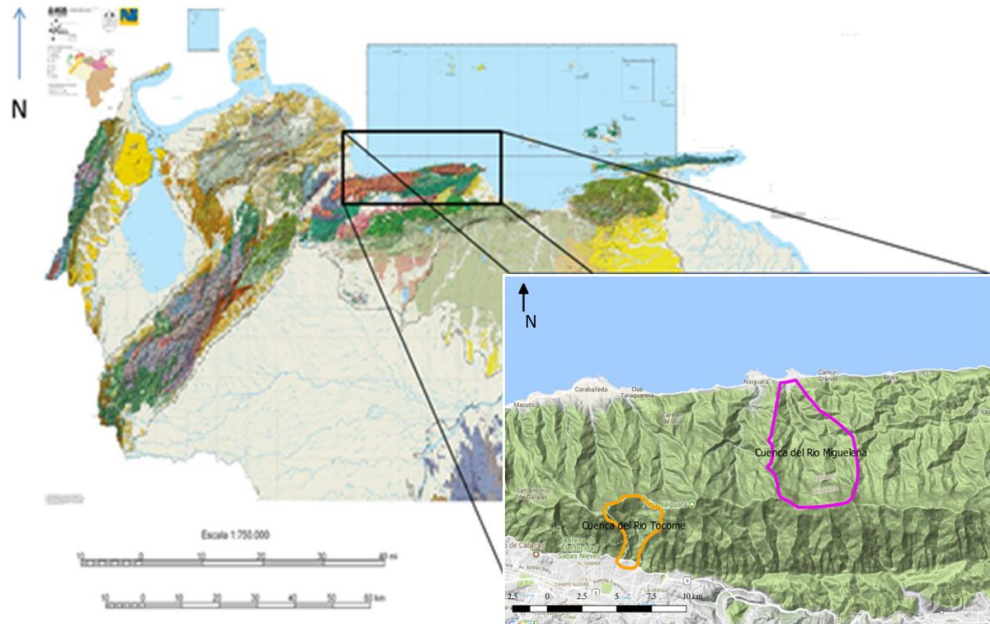


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio y principales formaciones geológicas que la conforman (Tomado y modificado de Hackley et al, 2005).

La zona de estudio se encuentra ubicada en el llamado bloque Naiguatá situado en la parte central de la Cordillera de La Costa (ver Figura 1).

El río Tócome es un pequeño curso de agua que posee una extensión de 4 km y escurre por el sector este de la ciudad de Caracas en el estado Miranda en los linderos Parque Nacional El Ávila desde el norte de la urbanización Los Chorros, mayormente fluye de norte a sur en su parte media alta pasa por el parque Los Chorros y desemboca en el río Guaire (Código Geológico de Venezuela, 1997). Numerosas simulaciones han demostrado la importancia que tiene este cauce al momento de generarse un fenómeno climático como los ocurridos en el estado Vargas durante 1999 y 2005.

El río Miguelena, afluente occidental del río Camurí Grande en el estado Vargas, que posee con una extensión de 4,3 km. Presenta una excelente sección a través de las principales unidades geológicas de la parte central de la Cordillera de la Costa. Allí, afloran dos de las tres fajas que constituyen la Serranía del Litoral de la Cordillera de la Costa (Urbani, 2002).

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el sector central de la Cordillera de La Costa yacen dos de los más prominentes altos topográficos, éstos son: la Silla de Caracas (cuenta con dos picos: uno llamado el Pico Oriental con aproximadamente 2620 MSNM y el Pico Occidental que cuenta con unos 2480 MSNM) y el Pico Naiguatá (2765 MSNM), entre ellos existen importantes sistemas fluviales que drenan hacia ambos flancos de la cordillera con contrastantes historias. En el flanco norte, se encuentra el río Camurí Grande y la Quebrada Miguelena, en los cuales existen diversos precedentes de actividad climática, uno de los más recordados y catastróficos tuvo lugar en 1999. Este evento conocido como “*La Vaguada de Vargas*”, ejerció un rol fundamental en los grandes movimientos de masas que sucedieron en ese entonces. Sin embargo, hacia el flanco sur, estos movimientos han ocurrido, pero a menor escala, y han sido menos reportados. Aunado la morfología de las cuencas antes mencionadas están controladas hacia la costa por un sistema de fallas, conocidos como falla Naiguatá (Rodríguez et al., 2001), así la actividad tectónica y la posible relación que guardan con los eventos climáticos es desconocida. Por ende, se plantea en la presente investigación realizar una comparación de diferentes índices morfométricos de dos cuencas: una en la parte norte constituida por el río Camurí Grande y la Quebrada Miguelena, y otra en el flanco sur, en ese caso, se estudiaría la cuenca del río Tócome.

Se desconoce si existe o no una interacción entre los agentes controladores del relieve actual con la tectónica y el clima para el área de estudio, por tal motivo, es fundamental establecer relaciones comparativas entre ambos flancos de la Cordillera de La Costa. Así, surgen entonces, ciertas interrogantes que delimitan el problema de esta investigación: ¿Están trabajando los procesos del clima, relieve y tectónica en la erosión en forma acoplada o no? ¿La tectónica jugaría un papel importante en la zona de estudio? ¿Existe alguna diferencia en términos de minerales pesados en ambas cuencas? Estos análisis e interpretaciones arrojarían una información hasta ahora inexistente para el área de estudio.

En esta investigación se tratará de discriminar los controles ejercidos sobre el relieve actual de las cuencas de los ríos Tócome y Miguelena-Naiguatá.

Con esta finalidad, se estimarán diferentes parámetros geomorfológicos fluviales cuantitativos a partir de la integración de varias bases de datos (modelos de elevación digital, datos de precipitación, mapa geológico-estructural y datos de sismicidad histórica-actual, entre otros), los cuales serán contrastados con los análisis morfotexturales de los minerales pesados extraídos previamente de los sedimentos actuales de los ríos estudiados. Tal comparación, permitirá reconocer la dinámica existente entre los procesos erosivos y/o tectónicos con la información registrada en los sedimentos actuales, esto arrojará los indicios suficientes de zonas propensas a levantamiento tectónico o por erosión, o incluso por la interacción de ambos procesos.

Aunque la presente investigación no contempla dataciones por métodos termocronológicos, las muestras serán preparadas para ser fechadas posteriormente y alimentar así la base de datos existente en el Laboratorio de Termocronología de la UCV.

1.4. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.4.1. Objetivo General

- Analizar la relación entre clima y tectónica como agentes controladores en el desarrollo del relieve, a través de la estimación y comparación de diferentes parámetros geomorfológicos cuantitativos, dimensión fractal e índices de erosión en las cuencas hidrográficas de los ríos Tócome, Distrito Capital y Miguelena, estado Vargas.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Calcular los índices de erosión utilizando el programa ArcGIS10.2.
- Crear gráficos de distribución de minerales pesados y mapas de índices de erosión a lo largo y ancho de la zona de estudio.
- Delimitar las geometrías de las cuencas y calcular atributos primarios y secundarios del terreno, dimensión fractal y otras medidas morfométricas de las mismas utilizando los programas ArcGIS10.2 y Matlab.
- Establecer relaciones estadísticas entre el relieve actual (cantidad de roca que queda presente después de la erosión), tasa de precipitación e índices de erosión con la finalidad de reconocer si el relieve puede estar controlado por clima, tectónica o por acoplamiento de ambos.
- Discriminar semejanzas y/o diferencias del control climático sobre el relieve actual mediante la comparación estadística de las curvas hipsométricas y medidas de dimensión fractal para las cuencas en estudio.

1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

En la cadena andina venezolana se ha discriminado un comportamiento diferencial de los procesos que controlan la exhumación de la misma (Bermúdez *et al.* 2013; Carmona y González, 2014). Este comportamiento asimétrico en los patrones de exhumación está acoplados con los efectos climáticos y tectónicos del área, por ejemplo, para la Sierra de La Culata ubicada en el flanco norte, el control sobre la exhumación es tectónico netamente; en contraste, para el flanco surandino sobre la Sierra Nevada de Mérida, existe una superposición de procesos, la tectónica que controla la exhumación desde el Mioceno tardío hasta el Plioceno, y desde ese momento las tasas de exhumación han disminuido y el clima toma un efecto preponderante en el levantamiento de la parte central de la cordillera (Bermúdez *et al.* 2013). Esto coincide con el efecto de barrera orográfica que impone la cadena andina. Para el caso de estudio, en la Cordillera de La Costa existe mucho menos información de las tasas de exhumación, relación entre clima y tectónica, así como el comportamiento de diversos sistemas de fallas como el Ávila, Tacagua, Naiguatá y su impacto hoy en día sobre las diversas poblaciones presentes en la zona. La presente investigación permitiría caracterizar morfológicamente los minerales pesados existentes en el área de estudio y la preparación de las muestras para su posterior fechado por los métodos termocronológicos, esos datos permitirían a futuro establecer las tasas de erosión y exhumación a largo plazo de este sector de la Cordillera de La Costa.

1.6. ANTECEDENTES

1.6.1. Metodológicos

Bermúdez et al., (2013), realizaron múltiples comparaciones de tasas de erosión a partir de datos termocronológicos detríticos en los Andes Venezolanos y con ello discriminaron las relaciones existentes entre tectónica, procesos superficiales y el

clima. La metodología allí desarrollada involucra la estimación de diferentes parámetros de al menos siete cuencas hidrográficas ubicadas a ambos lados del orógeno andino.

Flores (2013), realizó un estudio geomorfológico cuantitativo e identificó minerales pesados con el cual estimó la relación existente entre clima, tectónica y procesos superficiales en la cuenca del río Guárico y sus adyacencias. Pudo determinar que debido a que la subcuenca del río Orituco posee los granos con mayor índice de redondez, baja pendiente, menor relieve, mayor índice de transporte de sedimentos, menores índices de erosión, y menores tasas de precipitación; los minerales pesados están siendo transportados desde sectores más lejanos de la cordillera. Además, la erosión registrada en la sub-cuenca no refleja la erosión que se pudiera estar produciendo en los posibles terrenos fuentes. Esto se correlaciona con el hecho de que, en términos de contenido de minerales pesados, las muestras pertenecientes a esta sub-cuenca poseen una amplia gama de minerales en comparación con las otras dos subcuencas.

Figueira y Romero (2014), realizaron un estudio comparativo de los índices de erosión mediante el análisis de minerales pesados, difracción de rayos X y microscopia electrónica de barrido en el área de los ríos San Carlos, Guache, Capitanejo y Guanare. Adicionalmente, el análisis de texturas de granos de cuarzo y el estudio de las curvas hipsométricas permitió clasificar las diferentes áreas de acuerdo a su estado de madurez morfológica e identificar procesos que esculpieron el paisaje como glaciaciones.

Arcía y Viana (2014), realizaron un estudio del relieve actual y análisis de minerales pesados de terrenos adyacentes a los ríos Nirgua, Boconó y Apure evaluando la interacción clima, tectónica y procesos superficiales en la zona, para esto utilizaron los fundamentos de geomorfología cuantitativa, a partir de cálculos estadísticos-

matemáticos sobre modelos de elevación digital, junto con el análisis visual y computarizado de minerales pesados a siete 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, también realizaron estudios granulométricos por granulometría láser, microscopía electrónica de barrido, análisis petrográficos, difracción de rayos X. Estos autores discriminaron que en la cuenca de Boconó, el clima y la tectónica están trabajando de manera acoplada, permitiendo la generación de nuevo relieve y el transporte de sedimentos (erosión).

Albornoz y Lezama (2014) realizaron un estudio comparativo de la relación Topoforma-Clima-Tectónica en el sector suroeste de la cuenca del río Orinoco mediante el análisis de índices de erosión y minerales pesados para así poder permitir discriminar los efectos de clima o tectónica como agentes controladores del paisaje actual de esta extensa área.

Carmona y González (2014) determinaron la relación entre clima y tectónica sobre el relieve actual del flanco Surandino inferidos a partir del estudio de sedimentos modernos de las cuencas hidrográficas de los ríos Canaguá, Caparo, Michay y Uribante. Ese trabajo fue complementario al de Bermúdez et al., (2013) demostrando que el flanco Surandino es controlado más por efectos climáticos que por tectónica.

López y Uzcátegui (2014) realizaron un estudio comparativo 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, para así discriminar algunos indicios sobre la relación entre el clima, tectónica y procesos superficiales de esta área de estudio. Para el desarrollo de este trabajo utilizaron dos herramientas: el estudio morfo-textural de los minerales pesados y el análisis digital del terreno, con el cual se usaron imágenes de elevación digital derivadas de la NASA al igual que datos de precipitación obtenidas de la misión *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) la cual es una colaboración conjunta entre la NASA y la

Agencia de Exploración Japonesa (JAXA) para estudiar el clima (TRMM; <https://trmm.gsfc.nasa.gov/>), todos estos datos fueron integrados en el presente trabajo para un estudio de geomorfología cuantitativa. De aquí se pudo concluir que existen diferencias significativas en el contenido mineralógico de las muestras de la Formación Mesa, así como a las características de las cuencas situadas al norte y al sur del río Orinoco, concluyendo así diferentes fuentes de procedencia, 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.

Calderón (2015) realizó un estudio de los procesos erosivos en la zona circundante a los ríos Akanán y Aparamán mediante técnicas de geomorfología cuantitativa, lo cual permitió una primera aproximación del grado de erosión que han sufrido los tepuyes en esa zona y también buscó relacionar la erosión con tasas de transporte de sedimentos que conducen los ríos en estudio. Para esto, recolectó tres muestras de sedimentos y con ellos determinó indicativos de procedencia e identificó además de los minerales pesados existentes, el fenómeno de retrabajo en los granos mediante índices de redondez y esfericidad. Utilizando una combinación de softwares distintos para el procesamiento de datos: ArcGIS 10.2 (Análisis de datos y resultados de mapas), Envi 4.7 (evaluación de firmas espectrales), ImageJ (Procesamiento de muestras), Flex2d (Análisis Flexural) e Inca (Procesamiento de muestras mediante Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)) determinó que los procesos exógenos presentan una gran influencia en las condiciones del relieve actual en el sector tepuyano.

1.6.2. Estudios geológicos previos

Uzcátegui (1997) realizó un reconocimiento geológico del flanco sur de la Silla de Caracas, Miranda y Distrito Federal. Mediante su estudio logró reconocer en la zona una sola superficie de foliación con una orientación entre N6S0E y N70°W y

buzamientos predominantes al sur de 40° a 60°. El plegamiento más extendido es el de la foliación, formando monoclinales o pliegues a escala centimétrica y en menor proporción escala métrica. En el área reconoció la presencia del flanco sur del anticlinoria del Ávila. Dicho autor definió tres patrones de falla que en orden cronológico son: fallas con dirección E-W, fallas con dirección N60°E y fallas con dirección NW-SE. Determinó que las rocas alcanzaron la facies de los esquistos verdes en la zona del granate. Sin embargo la presencia de barroisita en las rocas máficas indica que estas fueron metamorfizadas a presiones algo mayores. Probablemente la Subunidad de Anfibolitas plagioclásicas fue sometida a un metamorfismo previo evidenciado por la alineación de inclusiones en la plagioclasa que definen una foliación más antigua.

Baena (1998), realizó el reconocimiento geológico de la cuenca del río Tacamahaca, Parque Nacional El Ávila. Determinó que Las facies metamórficas alcanzadas en la zona están representadas por las facies de los esquistos verdes, ubicadas en la zona de la clorita y la biotita en su mayoría, aunque se reportaron trazas de granate en algunas rocas. La presencia del anfíbol verde-azul (barroisita), encontradas en la unidad de gneis y esquistos cuarzo feldespático micáceo, indican que estas rocas alcanzaron un rango de presión mayor durante el metamorfismo. La foliación es muy prominente en toda la zona, presentando una dirección promedio de N65°E y buzamientos predominantes 50° y 60° al sur. Se reconocieron varios patrones de fallas: fallas de Dirección E-W pertenecientes a la falla del Ávila, fallas de dirección N50°W de movimiento aparente dextral, y fallas de rumbo N45°W y N75°W. Las diaclasas presentan una orientación predominante de N35°E y N5°E y de buzamientos promedios de 47° S y 47°N, con una frecuencia de 5:1 y 7:1. Este trabajo permitió afianzar el conocimiento de la geología del macizo del Ávila, dando así un aporte de los tipos litológicos allí existentes y estableciendo diferenciación petrológica más detallada de la geología regional realizada previamente a este trabajo.

Barboza y Rodríguez (2001), realizaron la integración de la geología del estado Vargas y del flanco Sur del Macizo del Ávila al norte de Caracas. Determinaron que la información geológica se encontraba dispersa y que no se disponía de mapas a escala 1:25.000 necesarios para la elaboración de los mapas de riesgos y la consiguiente ordenación territorial de la región. Integraron la cartografía geológica del estado Vargas y del flanco sur del Ávila, obteniendo 23 mapas a escala 1:25.000, con un área total de 2.400 Km². Según este estudio las unidades que afloran en la zona son las siguientes:

- Rocas Sedimentarias: Aluvión, Formación La Playita, Formación Guatire, Formación La Sabana, Grupo Cabo Blanco
- Asociación Metamórfica La Costa (A.M. La Costa): Mármol de Antímano, Anfibolita de Nirgua, Esquisto de Tacagua, Serpentinita Asociación Metasedimentaria Caracas: Esquisto de Las Brisas, Esquisto de Las Mercedes.
- Asociación Metamórfica Ávila (A.M. Ávila): Metadiorita de Todasana, Metatonalita de Caruao, Metagranito de Naiguatá, Metaígneas de Tócome, Gneis de Colonia Tovar, Complejo San Julián, Augengneis de Peña de Mora.

Cano y Melo (2001), realizaron un reconocimiento geológico entre las cuencas de Quebrada Seca y Rio Care, Edo Vargas, con objeto de complementar la base geológico-estructural faltante en esa región. Establecieron que la facie metamórfica encontrada en la zona corresponde a la facies de los esquistos verdes, ubicándose entre las zonas de la clorita y granate, con evidencias de un posible metamorfismo de mayor grado. Las rocas presentan una foliación con rumbo promedio N60°E con buzamientos entre los 50° y 70° tanto norte como al sur. Se observaron plegamientos en las distintas unidades que conforman el flanco de un antiforme de carácter regional, el cual contiene plegamientos de segundo orden. En el área se reconocieron cuatro sistemas de fallas, el de mayor extensión tiene un rumbo E-W con ligero buzamiento al norte y movimiento dextral, correspondiente al sistema de fallas de San

Sebastián y Macuto. El segundo grupo tiene una orientación N40°-60°W, con movimiento dextral y más joven que el anterior, y por último N50°- 70°E, posibles fallas inversas de movimiento dextral, ambas con buzamiento de ángulo alto hacia el sur. Se determinó que la zona fue sometida a esfuerzos en regímenes dúctil y frágil.

Angulo y Jurado (2004), realizaron un estudio petrográfico de las rocas del macizo Ávila recolectadas entre los ríos Miguelena y Camurí Chico y las quebradas Tacamahaca y Chacaíto, Edo Vargas-Miranda, este análisis principalmente de cantos rodados encontrados en las zonas bajas de los cauces permitió establecer la variedad litológica presente en las respectivas cuencas de drenaje.

Fournier et al. (2011), realizaron un estudio sobre la Termocronología $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de muestras del río Miguelena, estado Vargas y de rocas de afinidad greenviliana en el río Bocoy, estado portuguesa, Venezuela. Se analizaron muestras de rocas recolectadas de afloramientos relativamente bien expuestos a lo largo del río Miguelena para obtener nuevos conocimientos sobre el proceso de exhumación de la Serranía del Litoral en los cinturones de La Costa y Ávila en el norte de Sur América.

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

2.1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo presenta la geología regional, geología local, así como las formaciones geológicas presentes en el área donde se encuentran las cuencas de interés y la tectónica del área de estudio.

2.2. GEOLOGÍA REGIONAL

De acuerdo con Urbani (2002) la Serranía del Litoral de la Cordillera de La Costa está constituida de tres fajas de unidades distinguibles fácilmente por cartografía y diferenciables en campo y laboratorio, tales unidades fueron formadas en contextos geodinámicos distintos. Estas unidades son:

Norte: Asociación Metamórfica La Costa. Mesozoico

Centro: Asociación Metamórfica Ávila. Paleozoico-Precámbrico

Sur: Asociación Metasedimentaria Caracas. Mesozoico

De todas las unidades mencionadas anteriormente, las del Centro, constituidas por la Asociación Metamórfica Ávila son las que corresponden al área de estudio.

Las rocas de la Asociación Metamórfica Ávila (AM Ávila), con edades desde el Precámbrico al Paleozoico, representan un basamento exhumado durante un margen pasivo de corteza continental. La localidad tipo de la Asociación yace en el

Macizo Ávila (ver Figura 2) el cual está controlado principalmente por las fallas San Sebastián, Macuto y Ávila, y otras fallas intermedias que producen un escalamiento topográfico a ambos flancos del macizo. Las unidades individuales están conformadas por cuerpos de composición granítica, con composición y granulometría diversa. Destacan en estas unidades una amplia variedad de gneis como el llamado Augengneis de Peña de Mora. Las rocas graníticas yacen envueltas por rocas esquistosas de naturaleza metasedimentaria probablemente de edad Paleozoica. También existen intrusiones de diabasa, gabro, piroxenita, etc. La presencia de anfíbol verde-azul en las rocas máficas sugiere un metamorfismo de alta presión y baja temperatura.

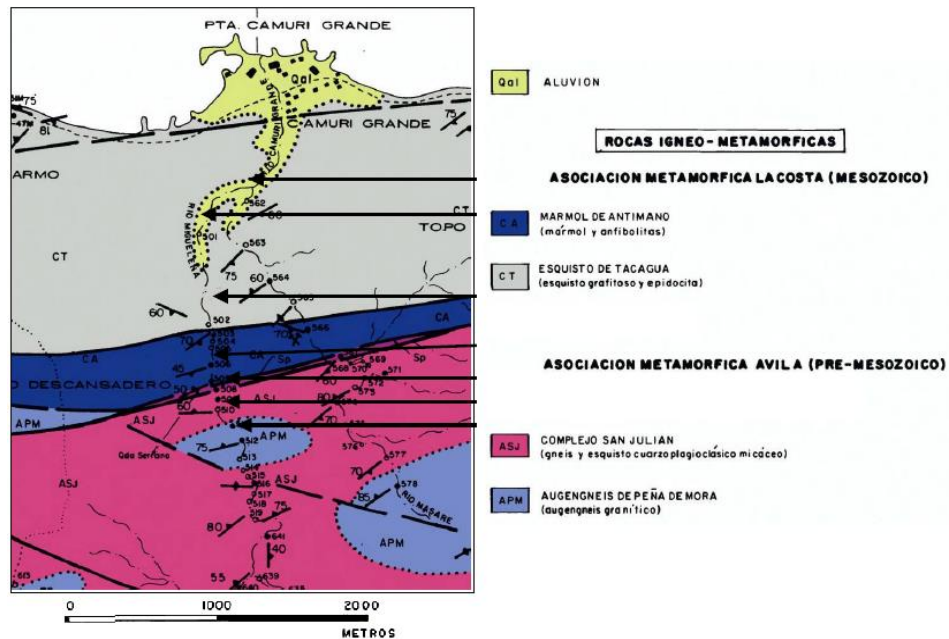


Figura 2. Asociaciones ígneo-metamórficas presentes a lo largo de la Quebrada Miguelena (Tomado y modificado de Urbani, 2002; Cano y Melo, 2002).

2.3. GEOLOGÍA LOCAL

La zona de estudio se encuentra ubicada en el llamado bloque Naiguatá situado en la parte central de la Cordillera de La Costa (ver Figura 3).

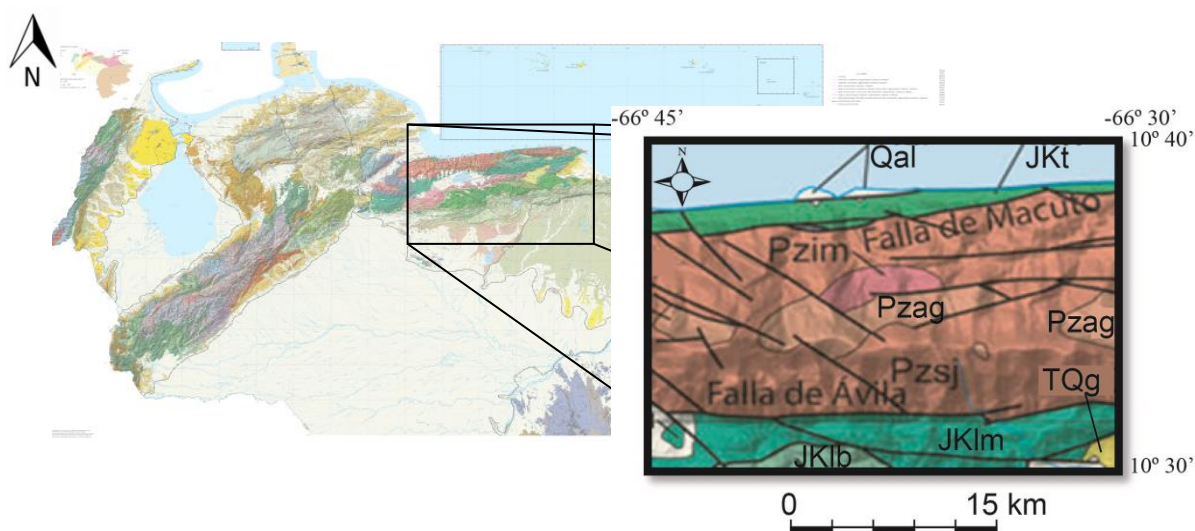


Figura 3. Ubicaci6n de la zona de estudio y principales formaciones geol6gicas que la conforman. En el mapa de la derecha las abreviaciones se refieren a: Qal: Aluvi6n (Pleistoceno a Holoceno). TQg: Formaci6n Guatire (Plioceno a Pleistoceno). Kta: Esquisto de Tacagua, Marm6l de Ant6mano sin diferenciar, Suite Metam6rfica La Costa (Cret6cico). JKlm: Esquisto de las Mercedes, Esquisto Chuspita sin diferenciar (Jur6sico a Cret6cico), Suite Metasedimentaria Caracas. JKlb: Esquisto Las Brisas, Suite Metasedimentaria Caracas (Jur6sico a Cret6cico). Pzag: rocas metagran6ticas, Suite Metam6rfica 6vila (Ordov6cico a P6rmico). Pzsj: Complejo San Juli6n, Asociaci6n Metam6rfica 6vila (Pale6zoico). Pzim: Rocas metaplut6nicas intermedias a m6ficas, Suite Metam6rfica 6vila (Pale6zoico). (Tomado y modificado de Hackley et al., 2005).

Las formaciones geol6gicas que se encuentran en las cuencas sujetas a estudio en la presente investigaci6n son: (ver Tabla 1).

Tabla 1. Formaciones que atraviesan cada una de las cuencas a estudiar

Río	Formaciones
Tócome	Metaígneas de TÓCOME Esquisto de SAN JULIÁN
Miguelena	Metagranito de NAIGUATA
	Esquisto de SAN JULIAN
	Augengneis de PEÑA DE MORA
	Fase (Complejo La Costa) TACAGUA
	Fase ANTIMANO

A continuación, se describen brevemente las principales características de las formaciones geológicas presentes en el área de estudio.

Formación Metaígneas de TÓCOME

Su localidad tipo se encuentra en el cauce medio del río Tócome, afluente del río Guaire, en el Parque Nacional El Ávila, al norte de la Urbanización Los Chorros de Caracas. Su litología García *et al.* (1995) al estudiar los afloramientos en la localidad tipo señala la presencia de cuatro tipos de rocas cuyo orden de abundancia aproximado es el siguiente: metagabro de grano fino (40%), metagabro foliado (25%), metatonalita (20%) y metagabro de grano medio (15%). Posee una extensión geográfica en la localidad tipo que forma esta unidad un cuerpo de 0,7 km² y la zona donde alcanza su mayor expresión es en el flanco sur del pico Naiguatá con aproximadamente 3 km² de extensión (Sabino y Urbani., 1995). La edad se estimó en función de que se encuentra circundado concordantemente con rocas del Esquisto de San Julián del Complejo Ávila y se consideran que esta unidad sea de edad Paleozoico-Precámbrico. (Tomado de PDVSA- Léxico Estratigráfico, 2011).

Formación Metagranito de NAIGUATÁ

Su localidad tipo es Fila Maestra de la Cordillera de La Costa en las cercanías del pico Naiguatá, Distrito Federal y estado Miranda. Presenta una extensión geográfica en un cuerpo alargado en dirección este - oeste a lo largo de la Fila Maestra de la Cordillera de La Costa, desde Puertas de Hércules hasta un poco antes del Pico Naiguatá (Sabino y Urbani, 1995). La litología según Sabino y Urbani (1995) un leucosienogranito de grano medio con ligera gneisoidad con una mineralogía promedio de feldespato potásico (45%), cuarzo (35%), plagioclasa - albita (15%), biotita (2%) y trazas de epidoto, muscovita, esfena, granate y hematita. (Tomado de PDVSA- Léxico Estratigráfico, 2011).

Formación Esquisto de SAN JULIÁN

Su localidad tipo es la Quebrada San Julián, que nace en la Silla de Caracas y desemboca en el mar Caribe en Caraballeda, Distrito Federal. Urbani y Ostos (1989) proponen adicionalmente secciones de referencia en el río Chuspa, al sur del pueblo de Guayabal, estado Miranda; carretera Chichiriviche - Colonia Tovar en el tramo de Paso Palomas - Naranjal, Distrito Federal, así como en la Quebrada Vallecito, Guaremal, estado Carabobo. Presenta una extensión geográfica desde la localidad tipo el noroeste de Caracas, se ha extendido hacia el oeste hasta la zona de El Cambur en el estado Carabobo, y hacia el este hasta Cabo Codera en el estado Miranda. La litología presente en la cuenca del río Tócome, al noreste de Caracas, se encuentran los siguientes tipos litológicos dentro de esta unidad, esquistos (plagioclásico - micáceo - epidótico, micáceo - cuarcífero, cuarzo - epidótico, micáceo - plagioclásico, clorítico -epidótico, anfibólico - plagioclásico, plagioclásico - epidótico, plagioclásico - anfibólico - epidótico) y gneises (plagioclásico - cuarzo - micáceo, plagioclásico - micáceo). Así mismo, el flanco sur del pico Naiguatá se encuentran: esquistos (feldespático - cuarzo - micáceo, cuarzo - micáceo, epidótico -

cuarcífero), gneises (feldespático - cuarzo - micáceo) y cantidades menores de cuarcita y mármol. Se ha sugerido una edad genérica de Paleozoico - Precámbrico al Complejo Ávila. (Tomado de PDVSA- Léxico Estratigráfico, 2011).

Formación Augengneis de PEÑA DE MORA

Su localidad tipo es la localidad de Peña de Mora, en la antigua carretera de Caracas a La Guaira, Distrito Federal. (Aguerrevere y Zuloaga, 1937) proponen una sección de referencia en el curso bajo del río Chichiriviche, Distrito Federal. Presenta una extensión geográfica desde la localidad tipo el noroeste de Caracas, se ha extendido hacia el oeste hasta la zona de El Cambur en el estado Carabobo, y hacia el este hasta cerca de Chirimena en el estado Miranda. En su litología descrita según (Aguerrevere y Zuloaga, 1937) describieron augengneis que interpretan como formados por inyección "lit - par - lit" de un magma granítico en una roca laminar, se encuentra que los augengneises son de colores claros ligeramente verdosos y meteorización marrón claro; los "augen" son mayoritariamente de feldespato potásico, llegando a alcanzar hasta 3 cm de largo y están rodeados por minerales micáceos y cuarzo. Se ha sugerido una edad genérica de Paleozoico - Precámbrico al Complejo Ávila, pero así mismo tiene implicaciones que permiten sugerir una historia geológica bastante más compleja, probablemente el protolito Precámbrico haya sufrido al menos un período de removilización en la orogénesis de fines del Paleozoico, relacionada con la formación de Pangea (Urbani y Ostos, 1989; Tomado de PDVSA- Léxico Estratigráfico, 2011).

Formación Fase (Complejo La Costa) TACAGUA

Su localidad tipo es en la Quebrada Tacagua, al norte de su intersección con la Quebrada Topo, Distrito Federal. Presenta una extensión geográfica de la franja de

afloramientos costeros, de esta fase se extienden desde Oricao hasta Naiguatá, Distrito Federal, con un ancho medio de unos 2 km. En la zona de la localidad tipo, los afloramientos se extienden casi paralelamente al valle de la quebrada Tacagua, desde Mamo hasta cerca del Viaducto 1 de la Autopista Caracas - La Guaira. Su litología en la localidad tipo y en los afloramientos en la zona costera del litoral central, se encuentra una asociación de esquisto albítico - calcítico - cuarzo - micáceo - grafitoso, de color gris oscuro, semejantes a aquellos descritos como típicos de la Formación Las Mercedes. Su edad fue calculada en base a los modelos tectónicos de Talukdar y Loureiro (1981) y Navarro *et al.* (1988), y la escasa información paleontológica (Urbani y Ostos, 1989) disponible, es probable que esta fase sea del Cretácico Tardío, pero a falta de más información se prefirió considerarla como Jurásico - Cretácico, sin diferenciar. (Tomado de PDVSA- Léxico Estratigráfico, 2011).

Formación Fase ANTIMANO

Según Dengo (1950) establece la localidad tipo a 0,5 km al norte de Antímamo, Distrito Federal, cuyos afloramientos hoy en día están totalmente cubiertos por el urbanismo de la ciudad de Caracas. Muy buenos afloramientos aún están visibles en las canteras de la Quebrada Mamera. La litología presente según Dengo (1951) describe esta formación como un mármol masivo de grano medio, color gris claro, con cristales de pirita, alternando con capas de esquistos cuarzo micáceos, y asociadas con cuerpos concordantes de rocas anfibólicas, algunas con estructuras de "boudinage". El mármol está formado de un 85-95% de calcita, con cantidades menores de cuarzo detrítico, muscovita (2,5%), grafito (2,5%) y pirita (2%). Ante la ausencia de fósiles y por su posición estratigráfica ha sido propuesta de edad Mesozoico medio a superior. Según los modelos de evolución de la Cordillera de La Costa de Ostos *et al.* (1987) y Navarro *et al.* (1989) se sugiere sea del Cretácico. (Tomado de PDVSA- Léxico Estratigráfico, 2011).

2.4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

En la Figura 4 se observa las principales estructuras presentes en la zona de estudio, también se ilustra la presencia del metagranito de Naiguatá.

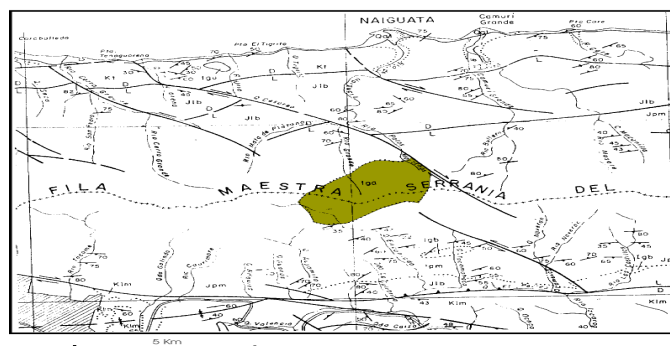


Figura 4. Mapa Geológico de la zona de estudio y posición del metagranito de Naignatá. (Tomado de PDVSA Léxico).

El río Miguelena (ver Figura 5), afluente del río Camurí Grande en el estado Vargas, cuenta con una buena diversidad de tipos de rocas y estructuras (Urbani, 2002).

Al visualizar el tramo de la cordillera en consideración, en sentido Este-Oeste puede notarse un claro escalonamiento que muestra grados distintos de exhumación, lo que se resume gráficamente en la Figura 5B.

El macizo del Ávila corresponde a los prominentes bloques de Galipán y Naguayá (elipse roja en la Figura 5A) y muestra una configuración tipo horst, por ser los únicos bloques claramente delimitados al norte y al sur por fallas E-W, como son las de San Sebastián y Ávila.

El Bloque Naguayatá en su flanco sur, al frente de la Urbanización Miranda, presenta un par de fallas E-W que definen un interesante cuerpo lenticular del Esquisto de Las Mercedes rodeado de rocas gnéissicas de la faja Ávila (ver “Cuña Ayala” en la Figura 5A), estas dos fallas pertenecen al sistema de fallas del Ávila,

pero hoy día inactivas. La estructura tipo horst de estos bloques se pierde tanto al Este de la falla Infiernito-Palacios, como al oeste de la falla de Tacagua, donde -en tierra- las fallas con orientación E-W se hacen menos importantes. El Bloque Carayaca (1 en Figura 5B) tiene la particularidad de que en él no aflora la faja Ávila, y la faja Costera se encuentra en contacto directamente con la faja Caracas, dicho bloque probablemente corresponda al nivel cortical más somero hoy día expuesto, de la interacción en el momento en que el arco frontal a la placa Caribe pasaba por este meridiano hace unos 40-50 Ma atrás. Los bloques Chichiriviche y Galipán (2 en Figura 5B) pueden representar un nivel cortical más profundo que el anterior, mientras que los bloques Colonia Tovar y Naiguatá (3 en Figura 5B) por su más reciente y gran levantamiento diferencial exponen niveles mucho más profundos de la corteza continental. De hecho, la faja Ávila en el bloque Naiguatá es donde presenta la mayor proporción de rocas metaígneas plutónicas (familia del granito), mientras que hacia el este y al oeste, se incrementa la proporción de rocas metasedimentarias (Urbani, 2002).

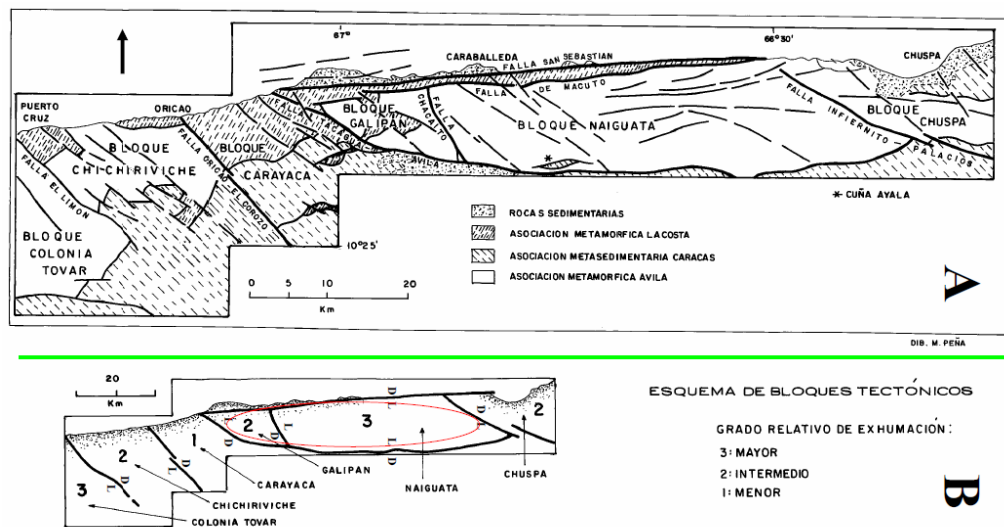


Figura 5. A) Principales rocas y asociaciones presentes en el área de estudio. B) Esquema de bloques tectónicos presentes en la Cordillera de la Costa (Tomado de Urbani, 2002).

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

3.1 INTRODUCCIÓN

El proceso de cuantificación de los parámetros geométricos y topológicos de la red de drenaje de una cuenca hidrográfica es el primer paso en la búsqueda de las relaciones entre éstos y las condiciones climáticas, geológicas e hidrológicas que determinaron su evolución (Mantrilla *et al.*, 1998). Los modelos que tratan de representar el proceso de formación de la red de drenaje pueden ser divididos en tres grupos: estadísticos (Shreve, 1966), determinísticos (e.g. Tokunaga, 1966) y los basados en principios físicos de minimización del gasto de energía (e.g. Rodríguez-Iturbe, 1992). El reciente desarrollo de computadores de alta capacidad de almacenamiento y procesamiento, ha popularizado el uso de sistemas de información geográfica (SIG) y de herramientas computacionales capaces de analizar a partir de modelo de elevación digital (MED), todas las cantidades derivadas de la red de drenaje. Los modelos digitales de terreno han adquirido gran importancia en la última década y hoy son considerados como información de primera mano para proyectos de distinta índole, por lo cual es fácil conseguir modelo de elevación digital (MED), de distintas regiones del mundo en una gran variedad de escalas.

3.2. MARCO TEÓRICO

3.1.1. La erosión

Desde la perspectiva geológica y de formación del paisaje, la erosión es entendida como parte del proceso de morfogénesis a través del cual se alteran y moldean las formas terrestres. En este proceso, se genera el desprendimiento de las unidades alteradas de la roca por agentes como el hielo, el agua y el viento, los cuales ocasionan el transporte de los materiales desprendidos, para formar los depósitos sedimentarios que se acumularán en las cuencas hidrográficas, aguas abajo (Duque, 2003).

Bergsma (1998, cit. Antezana, 2001), indica que los procesos de erosión dependen de la precipitación, del tipo de material que es removido, de la posición relativa en el paisaje (sobre flujo y humedad antecedente), de la forma de la pendiente, y del uso o el manejo que se le dé al suelo. La intervención de hombre, al cambiar el uso de los suelos ha favorecido la acción erosiva del agua y del viento, en especial en terrenos inclinados, al usar sistemas de cultivos y herramientas inadecuadas, al talar los bosques y/o quemar la vegetación, al construir obras de infraestructura, así, la erosión es inevitable y acelerada, dado el desequilibrio entre el agua, el suelo, la vegetación, además de la influencia de la acción del hombre (Ramírez, 2006).

Según Willet (2002), las interacciones entre los procesos tectónicos y superficiales son complejas y podrían trabajar en forma acoplada o retroalimentada, a través de diversos mecanismos. Estos circuitos de retroalimentación dentro del sistema dinámico dependen de la intensidad y duración de un proceso el cual impone condiciones iniciales sobre los restantes. Hay dos formas de retroalimentación: 1) forma directa en el cual la tectónica produce un aumento en las tasas de exhumación o incremento del relieve en los orógenos; y 2) forma indirecta en donde el aumento

del relieve induce un aumento de las tasas de erosión e incisión fluvial debido a cambios climáticos.

3.1.2. Factores que influyen en la respuesta hidrológica de una cuenca

Suelos y geología

- *El tipo de suelo y el grosor.* La textura del suelo (proporción relativa de partículas de arena, limo y arcilla) afecta a las tasas de infiltración. Los suelos arenosos tienen alta permeabilidad, mientras que los suelos arcillosos no. En las zonas áridas una corteza se puede formar en la superficie del suelo, sin embargo, se produce la disminución de la permeabilidad. En cuanto al espesor, este afecta directamente la cantidad de agua que el suelo puede absorber (Ramírez, 2006).

- *Geología.* Las cuencas hidrográficas sustentadas en una geología permeable tienden a tener una respuesta más lenta a la precipitación, aunque el flujo se mantiene durante un tiempo más largo durante períodos secos. Las cuencas hidrográficas sustentadas por materiales impermeables tienen una respuesta más rápida (Ramírez, 2006).

La vegetación y uso del suelo

- *Tipo de vegetación y la densidad.* La vegetación reduce el impacto de las gotas de lluvia y permite una estructura de suelo más “abierto”, lo que significa que las tasas de infiltración son más altas. La vegetación también afecta las tasas de incisión y pérdidas de evapotranspiración de la cuenca (Antezana, 2001).

- *Las áreas urbanas.* Depende de la proporción de la cuenca de drenaje que está urbanizada. Grandes áreas de superficies pavimentadas, los desagües y alcantarillas transmiten rápidamente tanto sedimentos como grandes volúmenes de agua a los

canales de ríos, lo que lleva a un aumento en el flujo máximo y un tiempo de retardo más corto (Antezana, 2001; Loredó et.al.,2007).

- *El pastoreo y el cultivo.* Cuando se produce la deforestación, las tasas de flujo superficial tienden a aumentar. El paso de maquinaria pesada y pisoteo por los animales compactan el suelo, reduciendo la permeabilidad, aunque el arado puede aumentar las tasas de infiltración. El flujo se puede concentrar en surcos de arado que corren arriba y abajo de la pendiente (Antezana, 2001; Loredó, 2007).

- *Drenaje Tierra.* La instalación de drenajes en el campo permite una rápida transferencia de escurrimiento en el cauce del arroyo cercano (Antezana, 2001; Loredó, 2007).

Características fisiográficas

- *Tamaño de la cuenca de drenaje y forma.* En las cuencas más grandes los tiempos de viaje son más largos, ya que el flujo tiene que viajar grandes distancias para llegar a la salida. El volumen total de la escorrentía aumenta con el área de drenaje. Cuencas de drenaje alargadas tienen una respuesta que es inicialmente más rápida pero posteriormente se va atenuando (Figueira y Romero, 2014).

- *Densidad de drenaje.* Cuando la densidad de canales de corriente es alta, la distancia media a lo largo del cual el agua tiene que viajar para alcanzar la red de canales se reduce, conduciendo a una respuesta más rápida (Bustos, 2014).

- *Topografía de la cuenca de drenaje.* Los tiempos de tránsito de redes fluviales toman más tiempo sobre pendientes pronunciadas. En las zonas de montaña, cuencas empinadas son a menudo asociadas con suelos delgados y la respuesta al transporte de material suele ser importante. La precipitación puede verse afectada por la altitud

y con cambios de aspecto, respecto a la trayectoria de las tormentas (Antezana, 2001; Loredó et al., 2007).

Características del canal

- *Canal y resistencia de la llanura de inundación.* La velocidad del flujo en canales fluviales se ve afectada por la rugosidad del nivel base, los bancos de arenas y la forma de la canal. Flujos de desbordamiento se retrasan por la rugosidad de la superficie inundable (Antezana, 2001; Loredó et al., 2007).
- *Almacenamiento de llanuras de inundación.* Cuando se excede la capacidad del canal, el agua se extiende hasta la llanura de inundación circundante, donde es almacenado hasta que las aguas de la inundación se alejan. Si el almacenamiento a lo largo de la llanura de inundación es limitado, un mayor volumen de agua se desplaza hacia abajo (Antezana, 2001).
- *Pérdidas de medios de transporte.* En ambientes secos el canal puede perder flujo debido a las altas tasas de evaporación y “fugas” por filtración a través del límite de canal (Antezana, 2001).

Factores meteorológicos

- *Condiciones antecedentes.* Son las condiciones que presentaba la cuenca de drenaje antes del inicio de la precipitación. También puede ser considerada como zonas con cambios sucesivos en el régimen de precipitaciones, en donde el suelo puede estar cerca de la saturación, lo que significa que una parte relativamente pequeña de entrada de precipitaciones podría dar lugar a una respuesta rápida de escorrentía (Antezana, 2001).
- *Intensidad de la lluvia.* Intensidad de la lluvia se expresa en milímetros por hora

(mm/horas). Cuanto más intensa es la precipitación, lo más probable es que se sobrepase la capacidad de infiltración del suelo (Antezana, 2001).

- *Duración de lluvia.* Este es el período de tiempo durante el cual un evento de lluvia ocurre. A medida que la tormenta avanza, áreas mayores de escorrentías contribuyen a lo largo de grandes extensiones. El canal de la red también puede extenderse aguas arriba como canales normalmente secos que comienzan a llevar flujo de sedimentos (Antezana, 2001).

3.1.3 Sistema fluvial, y estudio de la relación clima-relieve-tectónica

Un sistema es una colección de objetos relacionados y los procesos que se enlazan a tales objetos (Charlton, 2008). Dentro de los sistemas fluviales objetos tales como: laderas, red de canales y llanuras de inundación están enlazados entre sí por los procesos que mueven tanto el agua como los sedimentos. Al igual que otros sistemas, el sistema fluvial es jerárquico, en donde existen sub-sistemas integrados que operan a distintas escalas.

Dentro de la geomorfología fluvial, tres tipos de sistemas pueden ser identificados, éstos son: sistemas morfológicos, sistemas en cascada y sistemas de procesos-respuesta. Dentro del sistema morfológico existen: canales, laderas y llanuras de inundación los cuales son llamados sistemas de forma. Los sistemas o procesos en cascada se refieren a la forma como el flujo y los sedimentos se mueven a lo largo del sistema morfológico. Los sistemas en cascadas también son llamados sistema de procesos o sistemas de flujos. Esos flujos siguen interconectados a lo largo de toda su trayectoria, desde las laderas hasta los canales y a través de las redes de canales.

Los sistemas de procesos-respuesta describe el ajuste entre los procesos del sistema en cascada y el sistema morfológico. En otras palabras, esto permite

cuantificar la mutua retroalimentación entre procesos y formas, es decir, los procesos crean las formas y las formas afectan la manera en que los procesos operan (velocidad e intensidad).

La influencia de los controles exógenos y endógenos sobre el sistema fluvial está representada esquemáticamente en la Figura 6. Algunas variables internas como la geología, los suelos, la vegetación y la topografía tienen un mayor grado de independencia en el que sólo el sistema fluvial se ve afectado de manera limitada. Las variables externas como el clima, la tectónica, el nivel base y la actividad humana (que incluye el modelado del relieve, la altitud y tamaño de la cuenca de drenaje) también influyen en el sistema fluvial.

Los cambios de canal que son activados por controles externos se llaman cambios alogénicos. Si se refiere de nuevo al diagrama de flujo mostrado en la Figura 6, se observa que los cambios en los controles externos pueden tener efectos directos e indirectos sobre los cauces de los ríos.

Por ejemplo, un cambio en el clima tendrá una influencia directa sobre el volumen de escorrentía. Sin embargo, el crecimiento de vegetación también se verá afectado. Esto, a su vez, influye en los procesos de generación de escorrentía y la producción de sedimentos. Además, de la susceptibilidad del canal a la erosión, de esta forma las orillas de las cuencas se verían alterados por los cambios en el crecimiento de la vegetación en esas zonas.

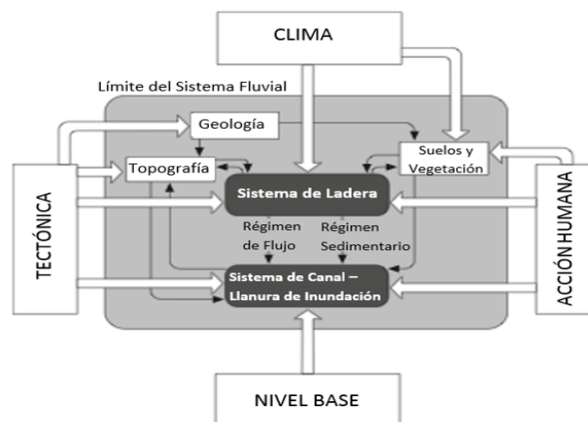


Figura 6. Representación simplificada de un sistema fluvial (Tomado de Charlton, 2008).

3.1.4. Geomorfología cuantitativa

3.1.4.1. Estimación de parámetros morfológicos de la cuenca y la erosión

La *erosión potencial* o riesgo de erosión se define como el efecto combinado de la precipitación, escurrimiento, suelo y topografía, causantes de la erosión. Estos factores se denotan en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, desarrollada por (Wischmeier y Smith, 1978), la cual establece el riesgo de erosión en una zona determinada.

Esta ecuación ha sido modificada y revisada en el transcurso del tiempo y puede calcular el índice de erosión (IE) de diferentes maneras en función de la tasa de gasto de energía potencial por fluidos, basándose en una predicción de la tasa de incisión de roca de fondo como una función potencial de la corriente (Finlayson, 2002; Whipple y Tucker, 2002). Una de las representaciones de esta ecuación es:

$$\varepsilon = KA^m S^n$$

Donde ε es la tasa de incisión local, K está relacionado al factor de erodabilidad del suelo o con el tipo de litología presente en el área de estudio, A es el área de drenaje, S es la pendiente del área de estudio y m , n son constantes (Bermúdez et al., 2013).

La ecuación antes mencionada, puede ser modificada para mejorar la relación de la incisión de río incluyendo la descarga, lo cual puede expresarse como

$$EI = K \sum (A_P P)^m S^n$$

(1)

donde la sumatoria viene representada por el área de drenaje pesada por las precipitaciones (A_P), P es la precipitación promedio para un cierto período de tiempo, en nuestro caso particular se emplearon los TRMM calibrados por Bodo Bookhagen

(<http://www.geog.ucsb.edu/~bodo/TRMM/>) cuyo período es de 12 años (1998 a 2009).

Para el cálculo del área de drenaje, inicialmente se determina la *dirección de flujo* (“*Flow Direction*”) cuyo principio fundamental es que el agua fluye desde un lugar más alto a uno más bajo y la *Acumulación de flujo* (“*Flow Accumulation*”) en la cual a cada pixel le asigna la suma del drenaje de flujo acumulado en cada pixel vecino, en caso contrario se le asigna cero y la precipitación representa un peso (Bustos, 2014).

Una vez realizada la acumulación de flujo, se deben transformar a unidades de área, lo que es equivalente a calcular el área de drenaje. Para ello se multiplica el mapa del flujo acumulado, por el área que representa la celda; produciendo así el mapa de área de drenaje.

$$\text{Área drenaje} = \text{Mapa de acumulación flujo} * \text{área de la celda.}$$

La pendiente del área de estudio S , se calcula a partir de un modelo digital de elevación y cuantifica la tasa máxima de cambio de una celda respecto a sus vecinos, la misma se calcula en unidades de porcentaje y se multiplica por 0,01 con el fin de que sea adimensional.

El factor de erodabilidad K se calcula asignando pesos a los distintos sectores con diferentes tipos de suelos o las unidades litológicas presentes en el área de estudio. En el caso particular de este trabajo se tomó $K=1$ ya que las cuencas ubicadas en el flanco norte y sur de la Cordillera de la Costa poseen básicamente la misma litología.

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:

- *Poder de flujo total o (TSP)*: tasa de incisión está controlada por el poder de flujo total o "Total Stream Power (TSP)", $m=n=1$.
- *Poder de flujo unitario (USP)*: tasa de incisión está controlada por el ancho del canal, también se conoce como "Stream Power Per Unit Channel Width (USP)", $m=1/2, n=1$.
- *Poder de flujo de cizalla (SSP)*: Si la incisión es controlada por el esfuerzo de cizalla fluvial o "Fluvial Shear Stress (SSP)", $m=1/3, n=2/3$.

Las expresiones anteriores miden la potencia erosiva de la corriente de agua basado en el supuesto que la descarga es proporcional al área de la cuenca específica de acumulación de flujo. También predicen la erosión total en el área del perfil de convexidad y la concavidad tangencial (zonas de convergencia y aceleración de flujo) y la depositación neta en áreas de perfil cóncavo (zonas de disminución de la velocidad de flujo). Mediante la ecuación (1) se calculan en este trabajo los índices de erosión para el modelo de precipitación TRMM calibrados por Bookhagen (2010). Tomado de la NASA.

Antes de comenzar, es necesario describir cada uno de los fundamentos que conforman la metodología que aquí se aplicará. A continuación, se presenta las diferentes medidas morfométricas que caracterizan una cuenca hidrográfica (ver Tabla 2), estos atributos son denominados atributos primarios (Wilson y Gallant, 2000) y su estimación es parte de la llamada geomorfología cuantitativa.

Tabla 2. Parámetros, ecuaciones y dimensión de las diversas variables a determinar en el presente estudio. Tomado y Modificado de Flores 2013 (Tomado de Gardiner, 1981; Gregory y Walling, 1973; Guevara y Cartaya, 1991; Henao, 1998; Horton, 1945; Leopold et al., 1964; Monsalve, 2000; Pastrana, 2003; Pérez, 1977; Senciales, 1998; Smith y Stopp, 1978; Strahler, 1968).

Variable	Parámetro	Símbolo	Ecuación	Dimensión
Escala de la cuenca	Área	A	-	L ²
	Perímetro	P	-	L
	Longitud	L	-	L
	Ancho	W	-	L
	Diámetro	D	$D = (4A/\pi)^{1/2}$	L
Gradiente y forma del relieve de la cuenca	Altura máxima	H	-	L
	Altura mínima	h	-	L
	Relieve máximo	H _b	$H_b = H - h$	L
	Radio del relieve	R	$R = H_b/L$	-
	Pendiente mediana	S _{med}	Construcción gráfica	%
	Pendiente media del perfil longitudinal de la corriente principal	S _m	$S_m = (\sum \sqrt{S_{m(i)}}/m)^2$	%
Forma de la cuenca	Elongación	S _e	$S_e = A^{0.5}/L$	-
	Factor forma	F _f	$F_f = A/L^2$	-
	Coefficiente de compacidad	K _c	$K_c = P/A^{1/2} \cdot 0,28$	-
Extensión de la red de drenaje	Longitud de la corriente principal	L _{cp}	-	L
	Longitud total de las corrientes	C _t	$C_t = \sum \text{longitud de las corrientes}$	L
	Densidad de drenaje	D _d	$D_d = C_t/A$	L/L ²

Los diferentes índices o atributos secundarios del terreno permiten identificar el volumen de sedimentos transportados, y el nivel de erosión en los diferentes niveles de una cuenca (ver Tabla 3).

Tabla 3. Atributos topográficos secundarios que puede ser calculado mediante el análisis digital del terreno a partir del modelo de elevación digital (MED) (Tomado de Moore, Grayson y Ladson, 1991).

Atributo	Definición	Significado
(1)	$W_T = \ln \left(\frac{A_S}{T \tan \beta} \right)$	Esta ecuación asume condiciones de estados estables y describe la distribución espacial y la extensión de zonas de saturación.
(2)	$W = \ln \left(\frac{A_S}{\tan \beta} \right)$	Esta ecuación en particular asume condiciones de estados estables y propiedades de suelos uniformes (ejem. La transmisividad es constante a lo largo de la cuenca y es igual a la unidad).
(3)	$W = \ln \left(\frac{A_S}{\tan \beta} \right)$	Estos índices cuasi dinámicos sustituyen el área efectiva de drenaje debido a la contribución de la pendiente del terreno y por ello supera las limitaciones obtenidas del estado estable usado en el primer par de las ecuaciones.
(4)	$SPI = A_S \tan \beta$	Medir el poder de la erosión del flujo de agua basada en la descarga asumida (q) es proporcional a un área específica de captación (A _S). Predice la erosión neta en áreas de perfiles convexo y cóncavo tangenciales (flujos de aceleración y zonas de convergencias) y deposición en áreas de perfiles cóncavos (zonas de decrecimiento de la velocidad del flujo).
(5)	$LS = 6m + 1 \left(\frac{A_S}{22.13} \right)^m \left(\frac{\sin \beta}{0.0896} \right)^n$	Este índice de capacidad de transporte de sedimento se deriva de la unidad teórica de flujo de potencia y es equivalente al factor longitudinal de la pendiente en la Ecuación universal revisada de pérdida de suelo en ciertas circunstancias.
(6)	$CIT = A_S (\tan \beta)^2$	La variación del índice de flujo de potencia es usado a veces para predecir las locaciones de las cabeceras de las corrientes de primer orden (indicador de canal).

3.1.4.2. Erosión y geometría 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 con la finalidad de identificar la influencia de esos procesos a diferentes escalas. 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 (Turcotte, 1997). 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, por ejemplo, las redes de drenaje, otros sólo deben operar sobre intervalos espaciales muy concretos, como es el caso de los glaciares.

Dimensión Fractal: Se define como la relación existente entre la longitud y la escala a la que se mide un objeto (Mandelbrot, 1984). Viene dada por la siguiente expresión:

$$Df = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{\log(N_{\lambda}(A))}{\log\left(\frac{1}{\lambda}\right)}$$

Donde $N_{\lambda}(A)$ representa el número de pasos necesarios para recorrer un objeto A considerando un tamaño de paso fijo (1). En el presente trabajo se determina

la dimensión fractal mediante el algoritmo de conteo de cajas o “*Box-counting*” empleando la función BOXCOUNT de Matlab (Moisy, 2008). El algoritmo consiste en cubrir el objeto A con una malla regular de tamaño unitario y contar el número de cajas o pasos que quedan ocupados, este proceso es repetido iterativamente disminuyendo el tamaño de la malla y contando nuevamente, finalmente se realiza un diagrama de dispersión log-log y se realiza un ajuste por regresión lineal, la pendiente se interpreta como la dimensión fractal del objeto.

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

La geometría fractal puede ser considerado como un método adecuado en el estudio de la geomorfología de los ríos (Turcotte, 2007; Khanbabaie 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.

3.1.4.3. Algoritmo de Box Counting

Procedimiento utilizado para el cálculo de la dimensión fractal que consiste en separar o dividir un elemento, objeto, área o segmento (en este caso las cuencas), en diversos fragmentos más pequeños o “cajas”, para analizar las piezas en escalas más pequeñas, además muestra la variación de la dimensión fractal tanto en el flanco norte como en el flanco sur para cada cuenca (Álvarez, 2017).

Este proceso se ha comparado con el acercamiento o alejamiento a través de métodos ópticos o por medio de programas de computadoras para examinar como varían las observaciones conforme a como varían las escalas. Sin embargo, contrario a otros procesos el Box Counting o Conteo de Cajas, en lugar de cambiar los distintos focos de una lente, se cambia el tamaño del elemento. En teoría el conteo de cajas se encarga de cuantificar las distintas escalas fractales, pero desde una perspectiva práctica, lo que hace necesario conocer la escala del objeto a estudiar, sin embargo, en muchos casos el factor escala no es conocido, por lo que se debe acudir al empleo de algoritmos que puedan facilitar estos datos (Álvarez, 2017).

3.1.4.4. Integral y Curva Hipsométrica

La hipsometría describe la proporción de un área que se encuentra a diferentes elevaciones de la superficie terrestre, es una herramienta útil para la caracterización topográfica ya que está ligada al desarrollo geomorfológico del paisaje. Puede ser estimada mediante la curva hipsométrica o la integral hipsométrica (Bustos, 2015).

La integral hipsométrica corresponde al área bajo la curva hipsométrica y por lo tanto está correlacionada con la forma de esa curva, se emplea como un indicador del “ciclo de erosión” (Strahler, 1952).

El ciclo de erosión puede relacionarse de acuerdo a los siguientes rangos de valores para H_i (Integral hipsométrica) al grado de madurez:

- $H_i \leq 0.3$: Cuenca en etapa de Vejez, se caracterizan por ser cuencas con poca pendiente. (Curvas cóncavas)
- H_i entre 0.3 a 0.6= Cuenca en etapa de Madurez o equilibrio (curva en forma de S)
- $H_i > 0.6$ = Cuenca en etapa Juventud o desequilibrio donde la cuenca es altamente susceptible a la erosión (curvas convexas)

3.1.5 Procesador de Imágenes (Image J)

El procesamiento digital de imágenes es un tipo específico de procesamiento realizado con un computador, donde la imagen debe ser convertida en forma numérica, esto se conoce como digitalización de imágenes. (Arcia y Viana, 2014).

Para la digitalización de imágenes, en este caso las fotografías de los granos observados mediante el Microscopio Petrográfico, se realizó a través del Programa Image J.

El programa Image J, es un procesador de imágenes de dominio público, que puede mostrar, editar, analizar, procesar, guardar e imprimir imágenes en 8 - bit, 16 - bit, 32-bit, además puede leer los formatos de imagen incluso TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS. Sus fuentes de apoyo son una serie de imágenes que comparten una misma ventana. Permite calcular el área y las estadísticas de valor de píxel de selecciones definidas por el usuario, medir distancias y ángulos, crear histogramas de densidad y parcelas perfil de línea. Se soporta en funciones de procesamiento de imagen estándar, como la manipulación de contraste, nitidez, suavizado, detección de bordes y el filtrado de mediana. Realiza transformaciones geométricas como el escalado y rotación (Arcia y Viana, 2014).

En este trabajo se empleó el software Image J específicamente para calcular valores de redondez y esfericidad de grano y así contribuir con más información al estudio y caracterización de los minerales pesados.

3.3. MARCO METODOLÓGICO

A continuación, se presenta en la Figura 7 un diagrama de flujo que muestra en forma resumida la metodología aplicada.

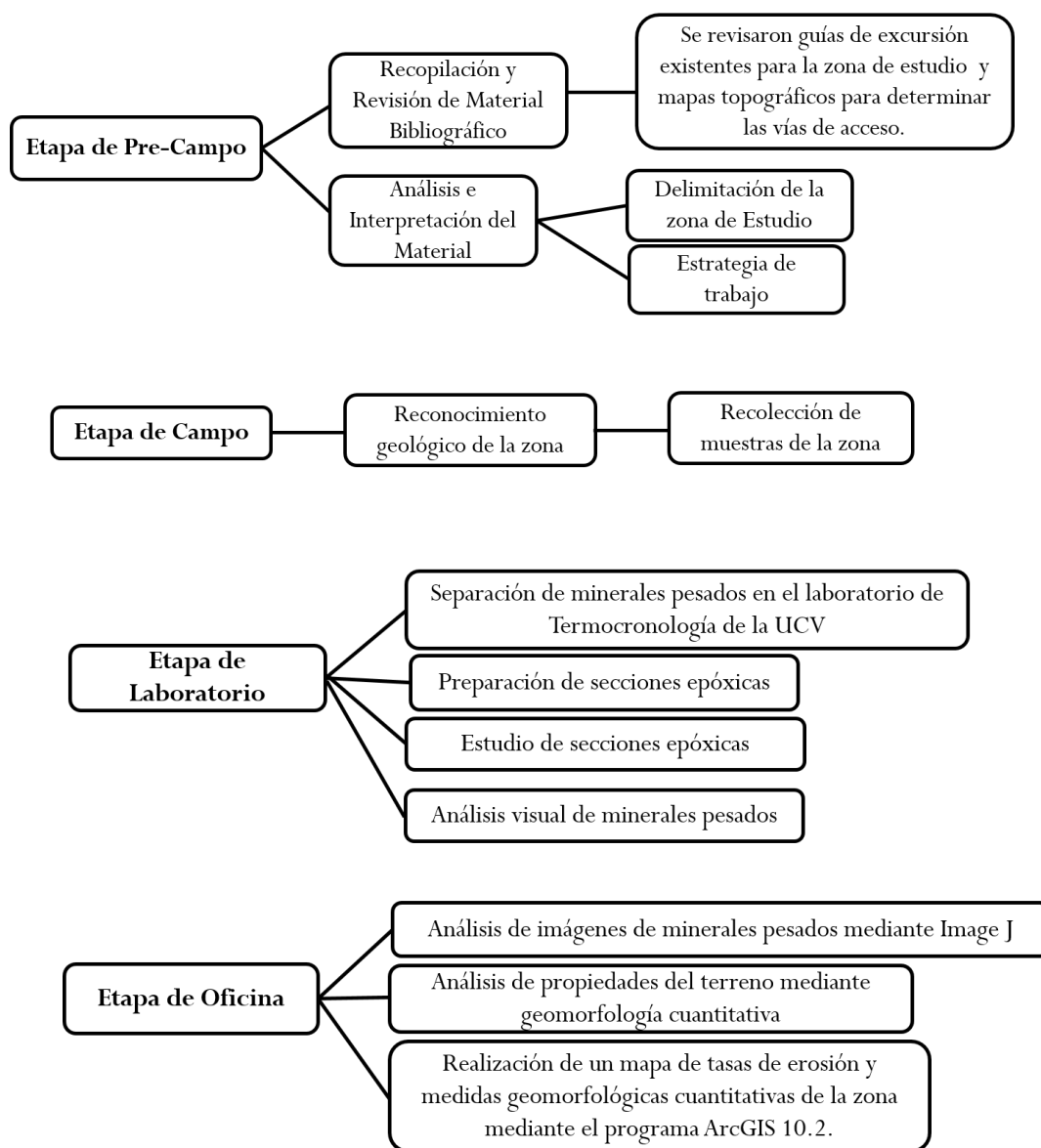


Figura 7. Metodología a emplear durante el desarrollo del Trabajo Especial de Grado.

3.3.1 Pre campo

Se realizó una recopilación bibliográfica y/o hemerográfica: libros, tesis, artículos, informes técnicos. Con la finalidad de organizar la salida de campo se revisaron guías de excursión existentes para la zona de estudio (Urbani, 2008) y mapas topográficos para determinar las vías de acceso.

Luego se procedió a una recopilación cartográfica que constaba de mapas geológicos, mapas topográficos, mapas de precipitaciones, fotografías aéreas, imágenes de satélite, imágenes de radar, datos de precipitación, evapotranspiración y humedad.

También se elaboró el análisis mapa fotogeológico, un estudio geomorfológico y la planificación del campo (vías de acceso, sitios para toma de muestras, etc). En este mapa se observaron las estructuras, redes de drenajes, las unidades en las que está dividida y vías de acceso de la zona.

3.3.2 Campo

El campo constó de siete días no consecutivos, los cuales fueron distribuidos en diferentes semanas. En este trabajo de campo se recolectaron seis muestras (5-10 kg) entre rocas in-situ y sedimentos actuales de río (ver Tabla 4).

Tabla 4. Ubicación de las muestras recolectadas en el campo.

Muestra	Longitud	Latitud	Elevación	Quebrada
1 pared (MG001)	-66,7686111	10,7902778	171	Miguelena
2 (MG002)	-66,7594444	10,6991667	188	Miguelena
3 los chorros (MG003)	-66,9341667	10,6486111	897	Los Chorros
4 (MG004)	-66,9341667	10,6486111	897	Los Chorros
5 (MG005)	-66,9341667	10,6486111	897	Los Chorros
6 (MG006)	-66,9341667	10,6486111	897	Los Chorros

Para el estudio de minerales pesados, se analizaron sólo cuatro muestras: MG002, MG003, MG004 y MG005. Las muestras MG001 y MG006 pertenecientes a muestras de afloramiento fueron trituradas previamente para poder disminuir el tamaño de grano a tamaño arena, sin embargo, estas dos muestras no fueron caracterizadas en la presente investigación, a futuro se espera poder fechar ambas muestras por termocronología y comparar las edades obtenidas con las edades de los sedimentos.

Las muestras de sedimentos recientes de río, MG 002, MG 003, MG 004, MG 005 (ver Figura 8) se obtuvieron a través del muestreo con una pala de sedimentos en bancos de arenas dentro del cauce del río y sus tributarios.



Figura 8. Muestras de sedimentos no consolidados.

Las muestras de roca se obtuvieron quitando la fracción meteorizada, es decir, expuesta hasta obtener roca fresca (ver Figura 9). Durante la recolección se emplearon: GPS, palas, mapas de la zona, piqueta, entre otros.



Figura 9. Algunas rocas de muestras de rocas in-situ recolectadas (MG001 izq. y MG006 der). Las litologías encontradas corresponden a gneis cuarzo-plagioclásico-micáceo. En esta fotografía se puede observar la gradación desde textura esquistosa (izquierda) hasta rocas de carácter gnésico (derecha).

3.3.3 Laboratorio y oficina

Separación de minerales pesados en el Laboratorio de Termocronología de la UCV.

A continuación, en la Figura 10, se ilustra el procedimiento que se siguió para la obtención de minerales pesados que se extraerán de los sedimentos recolectados en campo. Es importante destacar que dicho procedimiento se realizó para cada uno de los sacos de los sedimentos, los cuales se rotularon de la siguiente forma: MG 002, MG 003, MG 004, MG 005.

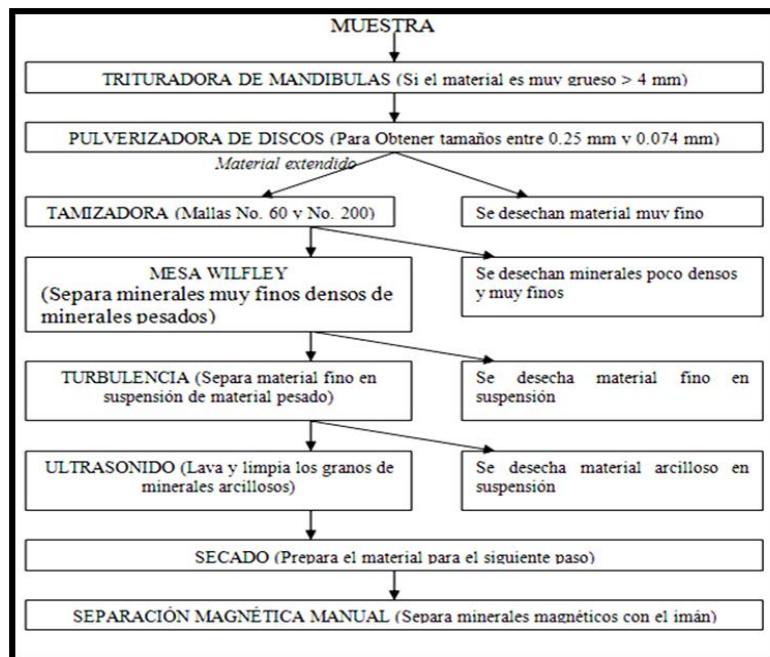


Figura 10. Diagrama de flujo que muestra el procesamiento de las muestras en el Laboratorio de Termocronología (Extraído Flores y Méndez, 2005).

En primer lugar, para la muestra MG 001, MG 006, que poseían un tamaño de grano muy grueso (mayor a 4 mm) fueron disminuidos a través del empleo de una Trituradora de Mandíbulas (ver Figura 11).



Figura 11. *Procesamiento de Muestras mediante una Trituradora de Mandíbulas.*

Posteriormente, debido a que las muestras aun poseían material grueso, para realizar un tamizado más eficiente, se procesaron las mismas mediante una Trituradora de Cilindro (ver Figura 12).



Figura 12. *Procesamiento de Muestras mediante una Trituradora de Cilindros.*

Seguido a esto, las muestras MG 002, MG 003, MG 004, MG 005 fueron sometidas a un Tamizado (ver Figura 13), donde se extrajo el material retenido en las mallas N°60 y N°200, el resto del material (muy fino) fue desechado.



Figura 13. Tratamiento de muestras mediante una Tamizadora.

El material retenido en la malla N°60 para cada saco, se guardó como respaldo y el retenido en la malla N°200 se sometió a la Mesa de Wilfley (ver Figura 14) para separar minerales muy finos densos de minerales pesados. Los minerales muy finos se desecharon, por no ser de interés en el presente trabajo.



Figura 14. Concentración de minerales mediante el empleo de la Mesa Wilfley.

Luego de la Mesa de Wilfley, a la fracción obtenida anteriormente se hace una separación magnética con el instrumento de alta intensidad Magnet – Lift (ver Figura 15).



Figura 15. Procesamiento de la muestra mediante el Separador Magnético Magnet Lift. Laboratorio de Termocronología UCV.

Para este procedimiento se introdujo las muestras en el equipo Magnet-Lift, con un aumento progresivo del amperaje en intensidades de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0 y 1,2 A, para obtener dos fracciones: una de minerales magnéticos de las fracciones 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0 y 1,2 y otra de los minerales no magnéticos de la fracción 1,2 A. Se seleccionó la fracción de minerales no magnéticos de 1,2A, y se realizó una separación de minerales pesados y livianos con el Bromoformo (ver Figura 16).



Figura 16. Material utilizado para la separación de minerales pesados y livianos con el Bromoformo

Para la separación de minerales pesados y livianos con el Bromoformo se empleó el siguiente procedimiento:

El procedimiento inicial antes de la separación por líquidos pesados constó de tres pasos: el lavado de la muestra por turbulencia, utilizando cilindros graduados de vidrio de 2 litros, donde se introduce la muestra y se aplica agua a alta presión de agua para crear un movimiento en el cual después de depositarse la muestra el material fino que queda suspendido en el agua se desecha, este proceso se repite hasta que el agua sea lo suficientemente clara; el lavado de la muestra por ultrasonido: utilizando el limpiador ultrasónico, se introduce la muestra en vasos de precipitado con agua destilada y se enciende el equipo, posteriormente se va cambiando el agua hasta que esta sea lo suficientemente transparente, al final se le agrega 0,5 gramos de oxalato de sodio, el cual funciona con un aglutinante para las partículas en suspensión; y el Secado de la muestra en el horno: usando el horno isotérmico existente en el laboratorio, se extiende la muestra en una bandeja de vidrio Pyrex, a una temperatura de 40 °C hasta que la muestra se seque.

Separación magnética primaria (imán y Magnet-Lift, ya que los minerales ferromagnéticos tienden a alterar los líquidos pesados, descomponiéndolos y oscureciéndolos.

Todos estos pasos, son resumidos en forma de diagrama de flujo, en la Figura 17, donde se aprecia, el depurado que hay que aplicarle a la muestra a fin de que la separación por líquidos pesados no se vea afectada por presencia de minerales arcillosos y ferromagnéticos adheridos a la muestra.

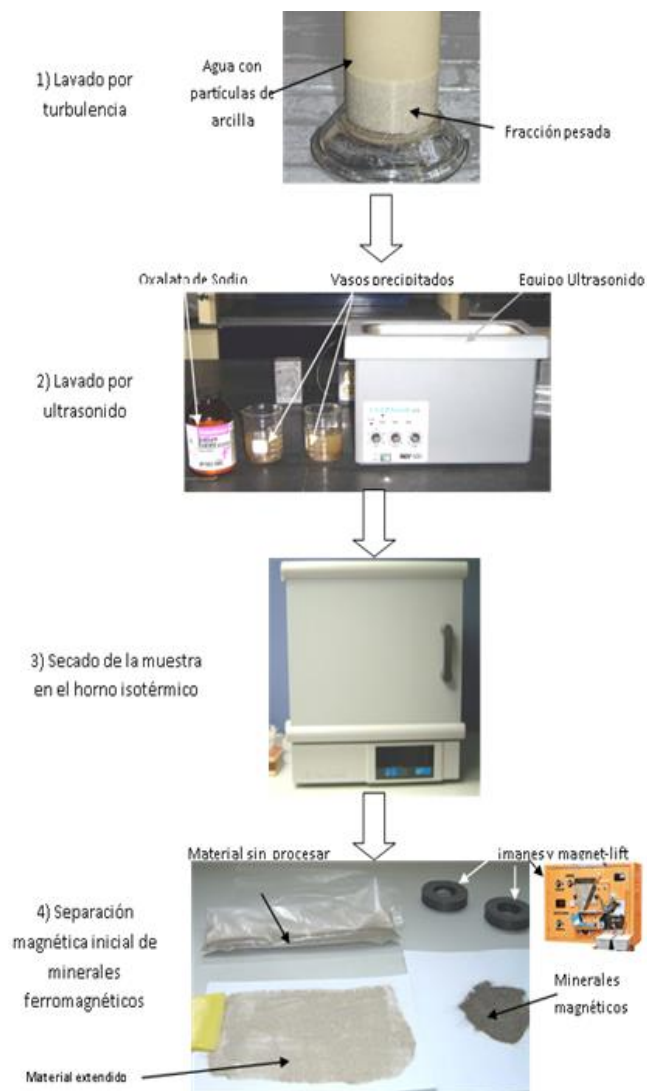


Figura 17. Procedimiento previo a la concentración de minerales por líquidos pesados.
(Tomado de Martínez y Materano, 2016)

Concentración por líquidos pesados: Los líquidos pesados son compuestos orgánicos que tienen relativamente una alta gravedad específica. Debido a que estos son líquidos y tienen una baja viscosidad, ellos son usados para separar diferentes fracciones minerales de rocas que han sido trituradas y concentradas previamente por otros métodos.

Los líquidos pesados son peligrosos y dañinos para el cuerpo si se usan incorrectamente. Para trabajar con estos, deben utilizarse lentes, tapabocas, batas de laboratorio, guantes y seguir los procedimientos de seguridad industrial en los laboratorios.

Concentración por tetrabromuro ((CHBr₂)₂) y/o bromoformo (CHBr₃): El tetrabromuro también es llamado tetrabromoetano, tetrabromuro acetileno, tetrabromoacetileno o líquido de Muthmann's pertenece a la familia química de los alcanos brominados, tiene un peso molecular de 345,7 y una densidad o gravedad específica de 2,96 a 25 °C es soluble con la acetona, benceno, agua y alcohol. (Tomado de Martínez y Materano, 2016)

El bromoformo llamado también tribromometano, pertenece a la misma familia del tetrabromuro, tiene un peso molecular menor a este último, de 252,75, y una densidad o gravedad específica de 2,894 a 25 °C, es igualmente soluble con la acetona, benceno, agua y alcohol. Es indiferente en esta primera etapa de separación por líquidos pesados que se utilice bromoformo o tetrabromuro. (Tomado de Martínez y Materano, 2016).

Después de que la muestra fue previamente procesada (ver Figura 18), se llenaron las $\frac{3}{4}$ partes de un embudo de separación de 500 mililitros con bromoformo o tetrabromuro, este embudo será denotado de ahora en adelante embudo 1. Luego se llenaron las $\frac{3}{4}$ partes de un embudo de separación de 2 litros con agua destilada, denotado de ahora en adelante como embudo 2. Se colocaron cada uno de estos embudos bajo cada una de las dos campanas de extracción existentes en el Laboratorio de Termocronología de la UCV, el embudo de separación más pequeño

que contiene el líquido pesado deberá colocarse en la campana que tenga mayor fuerza de extracción debido a que en esta el usuario tendrá una mayor protección contra los gases emanados por el líquido pesado. Se añadió poco a poco la muestra, utilizando embudo normal de vidrio, y con un removedor se movió la muestra lentamente.

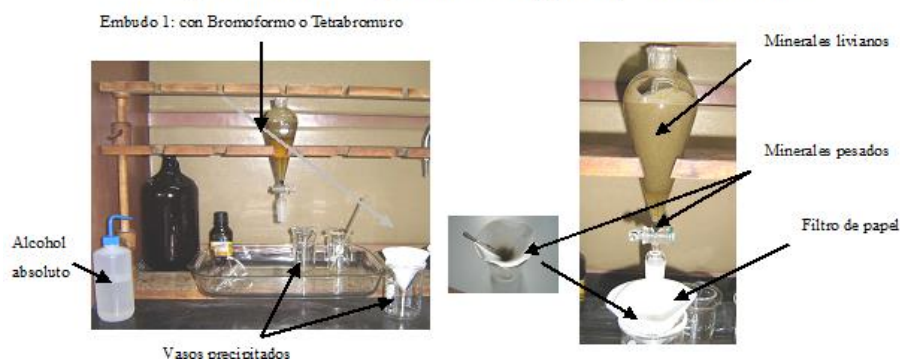
Se esperó hasta que se observarán dos fracciones separadas completamente por el líquido pesado, una nata o fracción ligera que se acumula en el tope del embudo y la fracción más pesada ($\geq 2,89 \text{ grs/cm}^3$) en el fondo del embudo. Se colocó al final del embudo 1, un vaso de precipitado de 100 ml con un embudo y papel de filtro paso rápido, y se abrió lentamente el embudo de separación y se dejó caer la fracción pesada.

Se colocó el embudo que posee el papel de filtro y la fracción pesada en otro vaso de precipitado de 200 ml y se lavó con alcohol hasta que este no presentara un color amarillento. Luego se dejó secar la fracción pesada bajo la campana y se guardó.

(a) Campanas extractoras del Laboratorio de Termocronología de la UCV:



(b) Contenido de la campana extractora 1, y pasos que se realizan en ella:



(c) Contenido de la campana 2 y pasos que se realizan en ella:

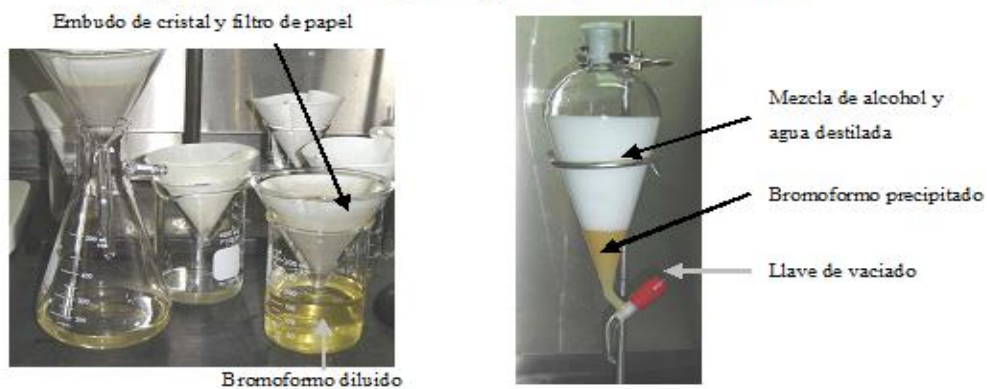


Figura 18. Concentración de minerales por líquidos pesados bromoformo o tetrabromuro, minerales pesados con densidad específica $\geq 2,89 \text{ grs/cm}^3$. (Figuras (b) y (c) tomada de Flores y Méndez, 2005).

Recuperación del tetrabromuro ((CHBr₂)₂) y/o bromoformo (CHBr₃):

la recuperación de estos líquidos (ver Figura 19) se logra mediante el vaciado del bromoformo o tetrabromuro diluido mediante el alcohol en agua destilada en un embudo de separación, al principio como el alcohol se precipita y es descompuesto por el agua, el líquido pesado cae al fondo, lográndose una separación efectiva en pocas (Martínez y Materano, 2016).



Figura 19. Precipitación del alcohol absoluto en agua destilada y separación por densidad del bromoformo o tetrabromuro. (Tomado de Martínez y Materano, 2016).

Luego de aplicar el bromoformo y separar los minerales pesados y liviano, se tomó la muestra de minerales pesados y se utilizó un imán común para lograr una separación de minerales magnéticos y no magnéticos. De este procedimiento se obtuvieron por una parte granos de magnetita principalmente, y otra fracción que contenía el resto de los minerales.

Posteriormente, para lograr una mayor precisión en el despeje de los minerales pesados, la muestra resultante de haber realizado la separación de la Magnetita mediante el imán. Se procesó nuevamente pero ahora mediante el Separador Isodinámico Frantz (ver Figura 20).



Figura 20. Separador Isodinámico Frantz. Laboratorio de Termocronología. UCV.

De este procedimiento se obtuvieron cinco fracciones (según la tabla de Hess en 1959): de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, y 1,2A. Las fracciones: Imán Común, 0,6A, 0,8A, y 1A, se analizaron a través del microscopio petrográfico.

Elaboración de secciones montadas e identificación mineralógica mediante el Microscopio Petrográfico.

Para la elaboración de las secciones montadas se seleccionaron las fracciones: Imán Común, 0,6A, 0,8A y 1,0A) de cada una de las muestras (MG002, MG003, MG004, MG005), para definir las características de los minerales pesados bajo el microscopio óptico y su posterior identificación.

Para la realizar este procedimiento se colocó el portaobjetos de vidrio sobre la mesa (ver Figura 21), uno para cada fracción de cada muestra y se esparció una capa muy fina de resina sobre él, evitando la formación de burbujas de aire, de tal forma que se inmovilizaron los granos, luego de unos minutos luego se rotularon los portaobjetos con su nombre correspondiente (ver Figura 22) y se procedió a la identificación de cada mineral mediante el Microscopio Petrográfico con ayuda del libro “*minerales pesados en color*” (Mange y Wright,2007).



Figura 21. *Elaboración de secciones montadas.*



Figura 22. *Secciones montadas con su respectiva identificación.*

Una vez identificados los minerales presentes en cada una de las muestras, se procedió a la elaboración de gráficos donde se observarán los minerales y su abundancia. Luego de manera detallada, se estudió cada mineral por separado, analizando a qué tipo de roca se encuentra asociado cada uno, y en conjunto para estimar posibles facies, que conllevaran posteriormente, con ayuda de la bibliografía, el Capítulo de Marco Geológico (Geología Regional y Local), y Análisis de esfericidad y redondez, a estimar las posibles rocas fuentes de la zona.

Análisis de la forma (redondez y esfericidad) de los granos

Los minerales (12 secciones montadas de 50 granos cada una) se estudiaron según su redondez, esfericidad y forma a través de la observación mediante una lupa, luego en el laboratorio se utilizó un programa de análisis de imágenes (Image J), el cual permitió hacer un análisis de partículas y proporcionó herramientas para medir longitudes de trayectorias y ángulos.

En la Figura 23 se muestra el procedimiento aplicado en cada grano, mediante el programa Image J, para la obtención de los valores de redondez y esfericidad.



Figura 23. Procedimiento aplicado en cada grano, mediante el programa Image J, para la obtención de los valores de redondez y esfericidad.

Aplicación de Geomorfología Cuantitativa

Utilizando el modelo de elevación digital (MED), para el área de estudio se procedió a calcular los índices geomorfométricos resumidos en las tablas 2 y 3 usando la plataforma ArcGIS 10.2. Posteriormente, se calculan los índices de erosión mediante la expresión (1) mostrada anteriormente en este capítulo, y se solapa la información estructural existente en el mapa de Hackley et al (2005).

También se definieron propiedades del terreno mediante geomorfología cuantitativa usando Matlab por el Prof. Bermúdez. Con respecto del estudio de los índices topográficos primarios y secundarios del terreno se obtendrán un conjunto de datos para cada cuenca que serán integradas y estudiadas en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presentan los distintos resultados obtenidos para cada actividad expuesta de forma detallada en el capítulo anterior, entre los cuales se encuentran la identificación mineralógica mediante el Microscopio Petrográfico, el análisis de esfericidad y redondez utilizando el Programa ImageJ, además del cálculo de parámetros geomorfológicos. Toda esta información se integró mediante gráficos, para facilitar la comprensión, comparación y análisis de los mismos.

4.2 LABORATORIO Y OFICINA

Identificación mineralógica mediante el Microscopio Petrográfico

A continuación, se presentan los diferentes minerales observados a través del microscopio petrográfico y su abundancia (Ver Anexos, Figura 77 hasta la Figura 88) además las características particulares que ayudaron a su identificación (Ver Anexos, Tabla 21 a 32).

Luego de obtener las distintas fracciones de minerales pesados para la muestra MG002 (Quebrada Miguelena), además de MG003, MG004 y MG005 que pertenecen a la Quebrada los Chorros, a través de diferentes amperajes (0,6, 0,8 y 1,0 amperes) se procedió a la comparación visual de cada fracción, tomando en cuenta la abundancia de cada uno de los minerales (Ver Figura 24 hasta Figura 29).

Fracción AMP 0,6

Para esta fracción se obtuvo la distribución de granos mostrada en la Figura 24, para la muestra MG002 se encontró una mayor proporción de cristales de cuarzo (11), seguido por muscovita (3), estauroлита (3), rutilo (2), turmalina (2), y topacio (2). Para la muestra MG003 se observaron con mayor frecuencia granos de óxidos (9), cuarzo (8), un conjunto de minerales desconocidos (6), muscovita (3), estauroлита (3) y en menor proporción apatito (1), circón (1), turmalina (1) y andalucita (1). Para la muestra MG004, las fracciones más representativas fueron el cuarzo (10), la hematita (6) y el óxido (6) y en menor proporción circón (3), turmalina (3), rutilo (3), barita (2), apatito (2) zoisita (1), topacio (1), andalucita (1) y muscovita (1). Posteriormente para la muestra MG005 se observa cuarzo (10), óxido (7), rutilo (7), barita (4) y hematita (3) y en menos proporción zoisita (1) y muscovita (1).

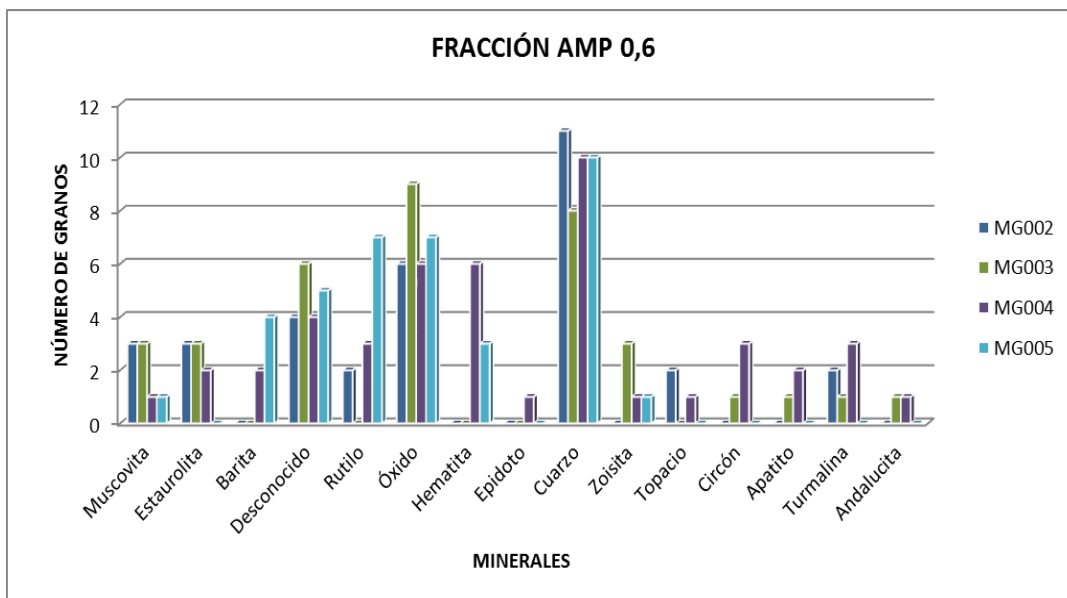


Figura 24. Minerales pesados presentes en la fracción magnética a 0,6 amperes en las muestras MG002, MG003, MG004 y MG005.

En la Figura 25 se muestra otro conjunto de minerales observados con 0,6 amp. En la muestra MG002, la distribución de dichos granos constó de una mayor

proporción de cristales de cloritoide (5), seguido por sillimanita (5), biotita (2), ilmenita (2), augita (2), hornblenda (1), yeso (1), pirita (1). En la muestra MG003 se presentan con mayor frecuencia granos de biotita (5), clinozoisita (4), hornblenda (2), y en menor proporción monacita (1), lawsonita (1), granate (1), glaucofano (1) y piemonte (1). Para la muestra MG004 se encontraron algunos granos de enstatita (1), dolomita (1), monacita (1), clinozoisita (1), lawsonita (1), augita (1). Finalmente, para la muestra MG005 se observa dolomita (5), granate (2), enstatita (1), clinozoisita (1), lawsonita (1), augita (1), siderita (1) y hornblenda (1).

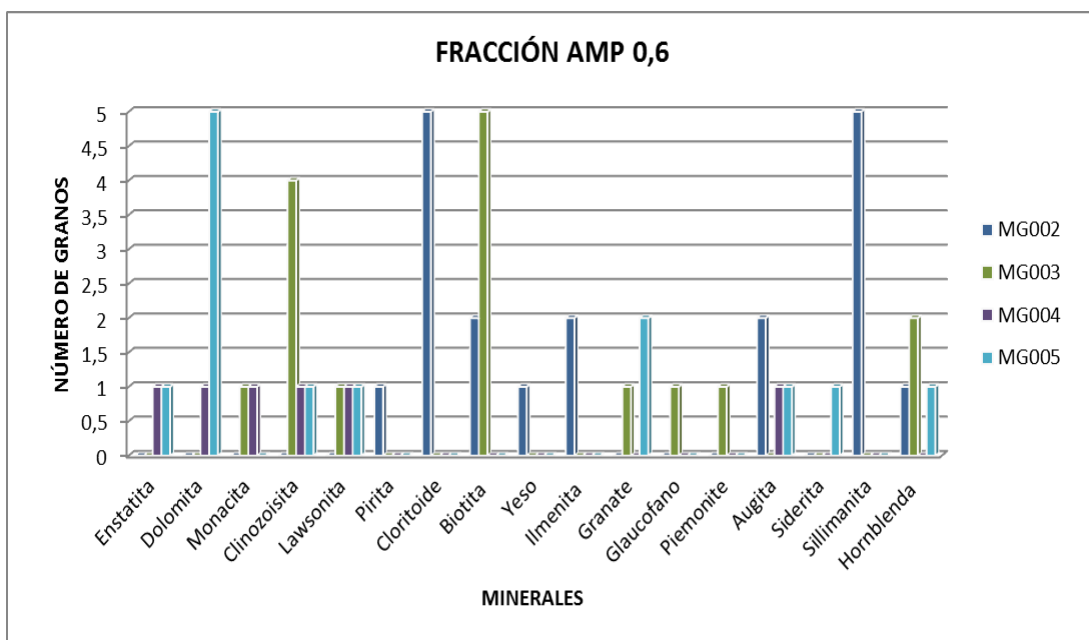


Figura 25. Otros minerales pesados presentes en la fracción magnética s 0,6 amperes en las muestras MG002, MG003, MG004 y MG005.

Fracción AMP 0,8

Para esta fracción se obtuvo la distribución de granos mostrada en la Figura 26, en la muestra MG002 se encontró una mayor proporción de óxidos (9), seguido por un conjunto de minerales desconocidos (6), epidoto (4), cuarzo (4), muscovita

(3), andalucita (2), barita (1), rutilo (1), hematita (1), zoisita (1), y turmalina (1). Para la muestra MG003 se observaron con mayor frecuencia granos de rutilo (9), óxido (8), un conjunto de minerales desconocidos (8), muscovita (3), estauroлита (3) cuarzo (3), y en menor proporción apatito (1) y turmalina (1). Para la muestra MG004, las fracciones más representativas fueron de óxido (10), cuarzo (7), desconocido (6), circón (4), rutilo (3), hematita (3), zoisita (3) y en menor proporción turmalina (2), estauroлита (2), epidoto (1), apatito (1) y enstatita (1). Posteriormente para la muestra MG005 se observa cuarzo (7), zoisita (5), desconocido (5), óxido (3), turmalina (3) y en menos proporción muscovita (2), rutilo (2), apatito (2), estauroлита (1), barita (1), hematita (1), circón (1) y enstatita (1).

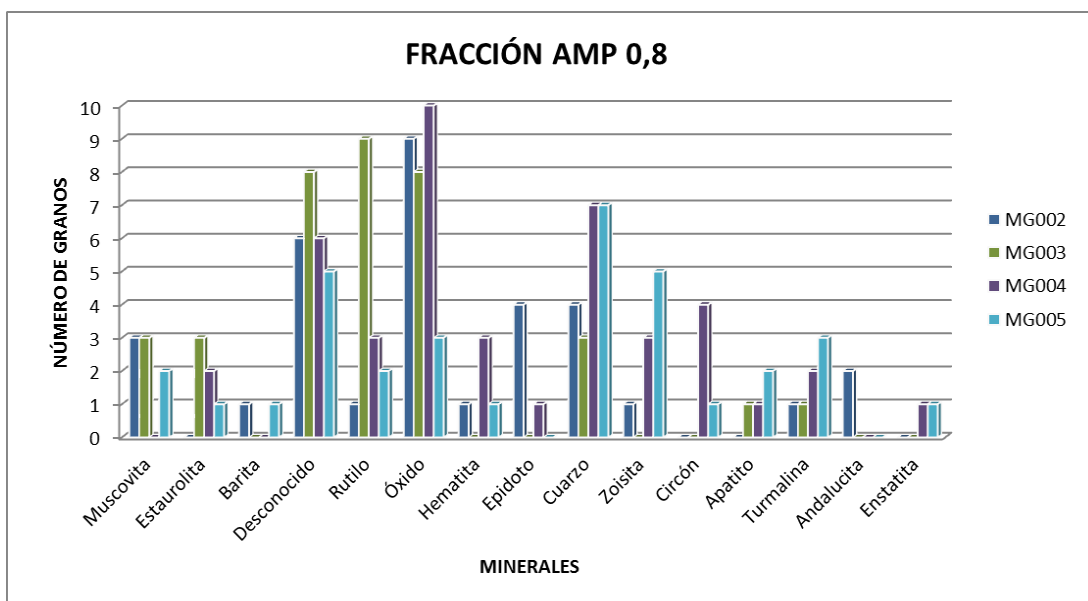


Figura 26. *Minerales pesados presentes en la fracción magnética a 0,8 amperes en las muestras MG002, MG003, MG004 y MG005*

En la Figura 27 se observa otro conjunto de minerales. En la muestra MG002, la distribución de dichos granos constó de una mayor proporción de cristales de biotita (8), seguido por sillimanita (3), augita (3), hiperesteno (1), ilmenita (1), y anhidrita (1). En la muestra MG003 se presentan con mayor frecuencia granos de clinozoisita (9), y en menor proporción cloritoide (3), biotita (1), granate (1), y

anhidrita (1). Para la muestra MG004 se encontraron algunos granos de clinozoisita (3), sillimanita (3), hiperesteno (1), augita (1), hornblenda (1). Finalmente, para la muestra MG005 se observa dolomita (5), clinozoisita (4), ilmenita (2), granate (2), limonita (2), lawsonita (1), fluorita (1), y piemonte (1).

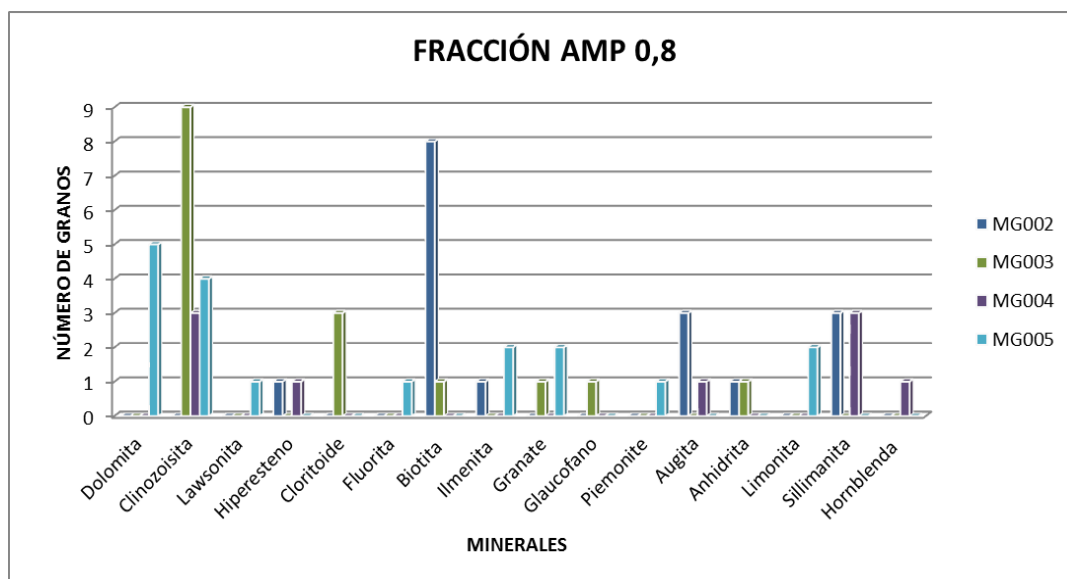


Figura 27. Otros minerales pesados presentes en la fracción magnética a 0,8 amperes en las muestras MG002, MG003, MG004 y MG005

Fracción AMP 1,0

Para esta fracción se obtuvo la distribución de granos mostrada en la Figura 28, para la muestra MG002 se encontró una mayor proporción de óxido (7), seguido por estaurilita (4), muscovita (4), cuarzo (4), andalucita (3), muscovita (2), turmalina (2), rutilo (1), topacio (1), y apatito (1). Para la muestra MG003 se observaron con mayor frecuencia granos de rutilo (10), estaurilita (7), cuarzo (7), un conjunto de minerales desconocidos (5), muscovita (3), óxidos (2) y en menor proporción hematita (1), axinita (1), andalucita (1) y enstatita (1). Para la muestra MG004, las fracciones más representativas fueron la hematita (7) y el circón (7), seguido de

granos desconocidos (6), óxidos (6), cuarzo (4), estauroлита (3), andalucita (3), topacio (1) y en menor proporción muscovita (1), topacio (1), turmalina (1). Posteriormente para la muestra MG005 se tienen los óxidos (7) y el cuarzo (6) como las fracciones más representativas, además de un grupo de granos desconocidos (5), y otros minerales como zoisita (5), rutilo (3), andalucita (3), barita (2), hematita (2), Muscovita (1), Turmalina (1) y Enstatita (1).

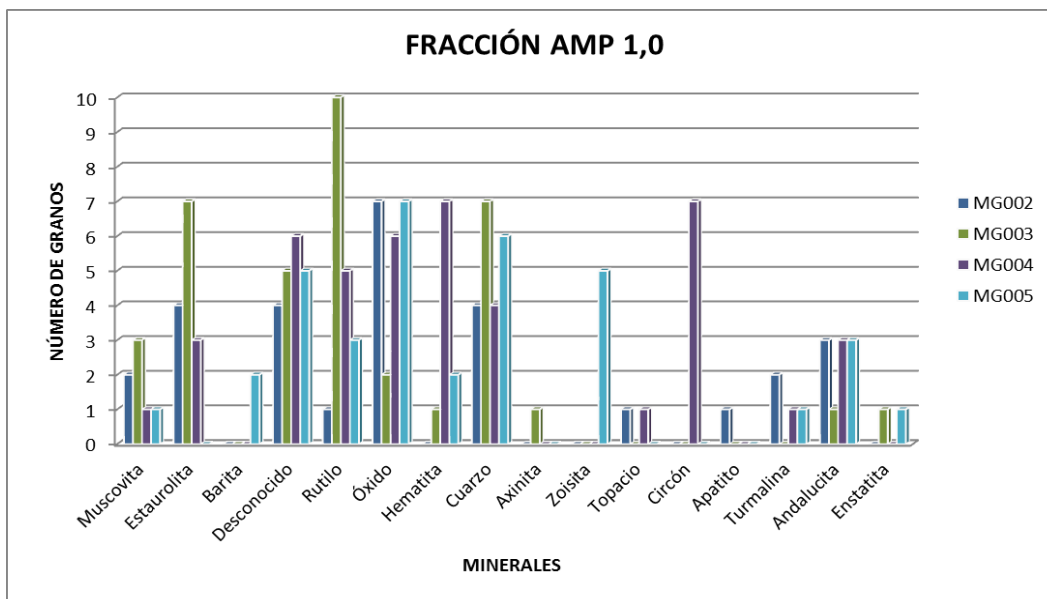


Figura 28. Minerales pesados presentes en la fracción magnética a 1,0 amperes en las muestras MG002, MG003, MG004 y MG005

En la Figura 29 se observa otro conjunto de minerales presentes, en la muestra MG002, la distribución de dichos granos constó de una mayor proporción de augita (5), seguido por sillimanita (5), dolomita (2), ilmenita (2), monacita (1), piemonte (1), limonita (1) y hornblenda (1). En la muestra MG003 se presentan con mayor frecuencia la serpentina (4), y en menor proporción cloritoide (3), glaucofano (2), lawsonita (1), egirina (1), piemonte (1), calcita (1), anhidrita (1). Para la muestra MG004 se encontraron algunos granos de monacita (1), lawsonita (1), hiperesteno (1), ilmenita (1), calcita (1), olivino (1), sillimanita (1) y hornblenda (1), finalmente

para la muestra MG005 se observa clinozoisita (4), dolomita (3), sillimanita (3), piemonte (2) y anhidrita (2).

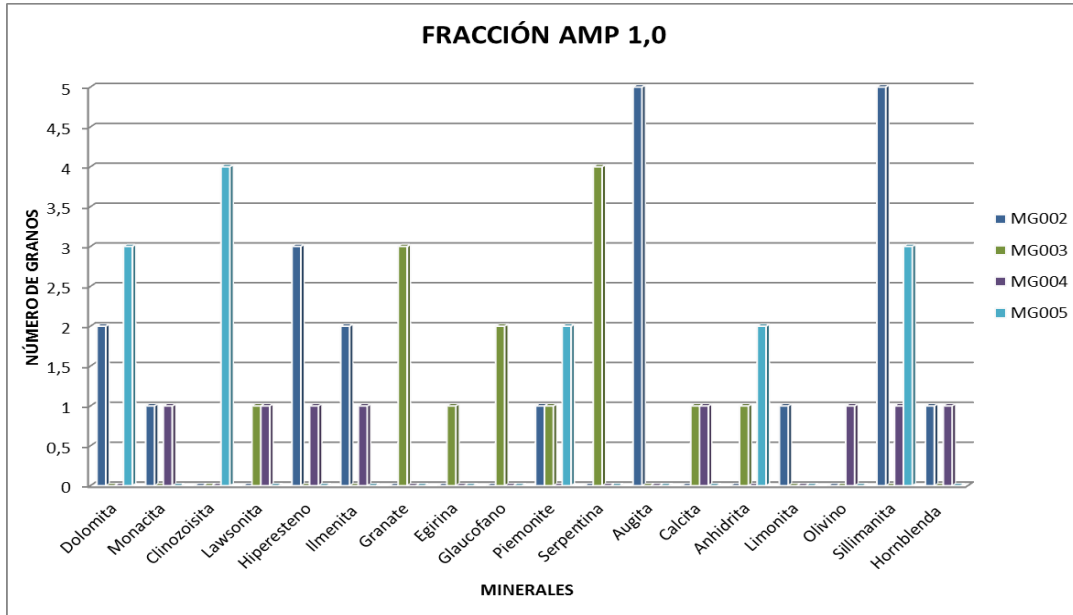


Figura 29. Otros minerales pesados presentes en la fracción magnética a 1,0 amperes en las muestras MG002, MG003, MG004 y MG005

Análisis de la forma (redondez y esfericidad) de los granos

Luego de la identificación de cada uno de los minerales tomando en cuenta las características observadas en el Microscopio Óptico, se procedió al estudio de la redondez y la esfericidad. A continuación, se muestran los valores promedios respectivos para cada fracción (ver Tabla 5).

Tabla 5. Valores promedios de redondez y esfericidad, de forma visual y mediante el programa ImageJ de las muestras MG002, MG003, MG004, MG005 y sus fracciones magnéticas AMP 0,6, 0,8 y 1,0

Muestra y fracción	Promedios			
	Visual		Image J	
	Redondez	Esfericidad	Redondez	Esfericidad
MG002 AMP 0,6	0,6	0,6	0,718	0,630
MG002 AMP 0,8	0,6	0,7	0,723	0,649
MG002 AMP 1,0	0,6	0,7	0,645	0,675
MG003 AMP 0,6	0,6	0,7	0,726	0,690
MG003 AMP 0,8	0,5	0,7	0,699	0,689
MG003 AMP 1,0	0,6	0,6	0,697	0,699
MG004 AMP 0,6	0,7	0,6	0,699	0,681
MG004 AMP 0,8	0,6	0,7	0,690	0,688
MG004 AMP 1,0	0,6	0,7	0,690	0,676
MG005 AMP 0,6	0,5	0,6	0,633	0,654
MG005 AMP 0,8	0,6	0,7	0,681	0,695
MG005 AMP 1,0	0,5	0,6	0,620	0,641

Para facilitar la comparación de los valores de redondez y esfericidad entre las muestras y visualizar sus variaciones, se elaboraron gráficos de columnas los cuales se muestran a continuación (ver Figuras 30 y 31).

En la Figura 30, se tiene que la muestra MG002 con amperaje 0,6 posee el mismo valor promedio (0,6) de redondez obtenido de manera visual que las muestras: MG002 AMP 0,8; MG002 AMP 1,0; MG003 AMP 0,6 y MG003 AMP 1,0; y la muestra MG002 con amperaje 0,8 presenta la misma esfericidad (0,7) obtenido de

manera visual que las muestras: MG002 AMP 1,0; MG003 AMP 0,6; MG003 AMP 0,8; MG004 AMP 0,8; MG004 AMP 1,0 y MG005 AMP 0,8. En cuanto al programa Image J la muestra MG003 con amperaje 0,6 posee el valor mayor de redondez (0,726) y la muestra MG003 con amperaje 1,0 presenta la mayor esfericidad (0,699). En cuanto a la diferencia entre los valores determinados de manera visual y según el programa Image J es poca, los valores son bastantes parecidos, con una diferencia menor a 0,15.

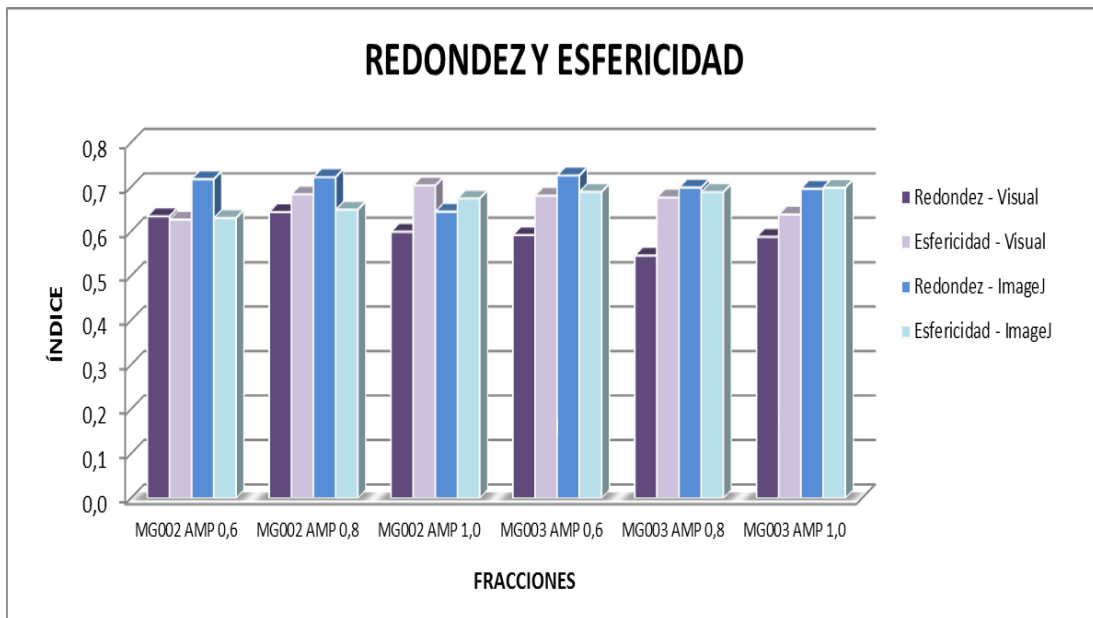


Figura 30. Valores promedios de redondez y esfericidad de forma visual y mediante el programa ImageJ, de las muestras MG002 y MG003 con sus fracciones AMP 0,6, AMP 0,8 y AMP 1,0.

En la Figura 31, se tiene que la muestra MG004 con amperaje 0,6 posee el mayor valor promedio (0,7) de redondez obtenido de manera visual con respecto a las otras fracciones, y la muestra MG004 con amperaje 0,8 presenta el mismo valor promedio (0,7) de esfericidad obtenido de manera visual que las muestras: MG004 AMP 1,0 y MG005 AMP 0,8. En cuanto al programa Image J la muestra MG004 con amperaje 0,6 posee el valor mayor de redondez (0,699) y la muestra MG003 con amperaje 1,0 presenta la mayor esfericidad (0,695). En cuanto a la diferencia entre los valores determinados de manera visual y según el programa Image J es poca, los

valores son bastante parecidos, con una diferencia menor a 0,1 en la redondez y menor a 0,05 en la esfericidad.

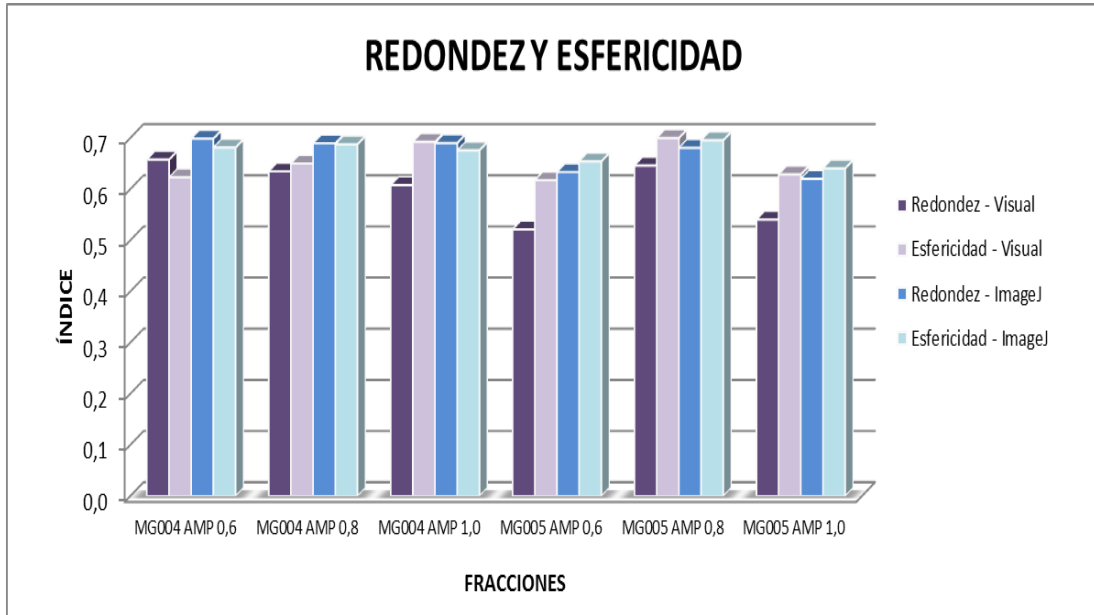


Figura 31. Valores promedios de redondez y esfericidad de forma visual y mediante el programa ImageJ, de las muestras MG004 y MG005 con sus fracciones AMP 0,6, AMP 0,8 y AMP 1,0

Aplicación de Geomorfología Cuantitativa

Posterior a análisis de la forma (redondez y esfericidad) de los granos se procedió al cálculo (usando el software ArcGIS 10.2.) de diversas variables en cuanto a la escala (área, perímetro, longitud, ancho, diámetro), variables en cuanto a la forma (H_i , elongación, factor de forma, compacidad), además de elevación, pendiente, precipitación y delimitación de la red hidrográfica de cada cuenca. Luego se realizó el cálculo de los atributos secundarios, principalmente el *relieve geofísico*, el cual se define como la diferencia entre el máximo de las elevaciones considerando distintos radios (0.5k, 1k, 3k, 5k, 7k) con las elevaciones para cada píxel (Montgomery y Brandon, 2002), potencial total de flujo, poder unitario de la corriente, poder de cizalla de la corriente, índices de humedad, índice de la capacidad de transporte de sedimentos y finalmente dimensión fractal de las cuencas Chorros y Miguelena. A continuación, se muestran las tablas y gráficos comparativos de las variables mencionadas anteriormente para dichas cuencas. (Ver Figura 32 hasta Figura 45 y Tabla 6 hasta Tabla 17).

Atributos Primarios

Como se observa en la Tabla 6, la Cuenca Miguelena posee mayor área ($22894252,20 \text{ m}^2$) que la Cuenca Chorros, por consiguiente, también mayor perímetro (21347,48 m), longitud (7720,99 m), ancho (2965,20 m) y diámetro (5399,06 m).

Tabla 6. Valores del Área, Perímetro, Longitud, Ancho y Diámetro (m) de las cuencas Chorros y Miguelena.

Cuenca	Área (m ²)	Perímetro (m)	Longitud (m)	Ancho (W) (m)	Diámetro (D) (m)
Chorros	9596883,45	13809,24	5529,31	1735,64	3495,59
Miguelena	22894252,20	21347,48	7720,99	2965,20	5399,06

El área de ambas cuencas (Figura 32) presenta valores en un intervalo de 10000000 m² y 22000000 m² aproximadamente, siendo la Cuenca Miguelena casi el doble de tamaño que la Cuenca Chorros. En cuanto al Perímetro, Longitud, Ancho y Diámetro (Figura 33) se observan valores que van desde 1700 hasta 22000 metros

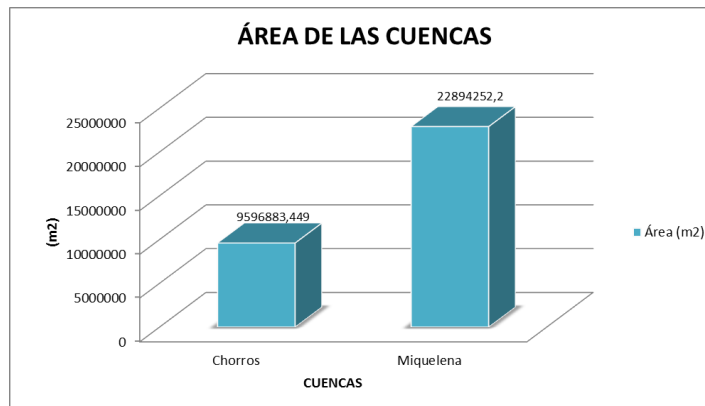


Figura 32. Valor del Área (m²) de las cuencas Chorros y Miguelena.

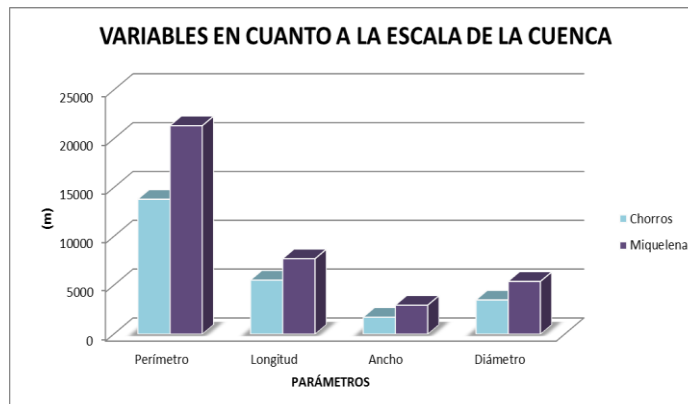


Figura 33. Valor del Perímetro, Longitud, Ancho y Diámetro (m) de las cuencas Chorros y Miguelena.

En la Tabla 7, los valores de HI, Elongación y Factor de forma se encuentran en un intervalo de 0,31 y 0,62, no se observan mayores diferencias entre ambas cuencas.

Tabla 7. Valores de H_i , Elongación, Factor de forma y Compacidad de las cuencas Chorros y Miguelena.

Cuenca	H_i	Elongación	Factor de forma (Fr)	Compacidad (Kc)
Chorros	0,57	0,56	0,31	1,26
Miguelena	0,42	0,62	0,38	1,26

En cuanto al valor de H_i , en la Cuenca Chorros es mayor, sin embargo, la Elongación y Factor de forma presentan un valor más alto en la Cuenca Miguelena, ambas cuentan con una Compacidad de 1,26 (Tabla 7).

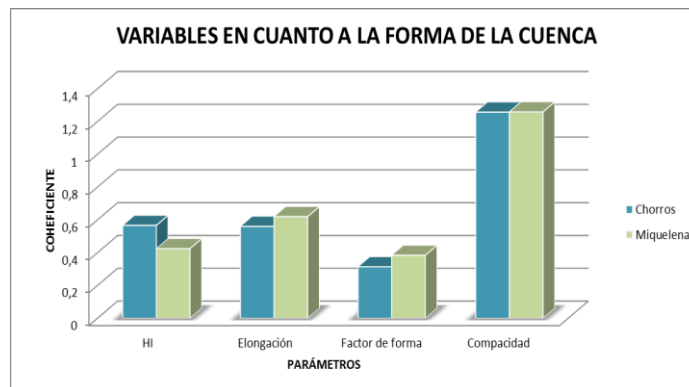


Figura 34. Valores de H_i , Elongación, Factor de forma y Compacidad de las cuencas Chorros y Miguelena

Tabla 8. Valores de la Elevación (m) de la zona.

Cuenca	Elevación			
	media	desviación estándar	min.	máx.
Chorros	1892,91	341,36	945	2619
Miguelena	1002,22	570,33	53	2290

Respecto a la Elevación (Tabla 8), los valores media ($1892,91 \pm 341,36$ m), mínimo ($945 \pm 341,36$ m), y máximo ($2619 \pm 341,36$ m) son mayores en la Cuenca Chorros, a pesar de ser la Cuenca Miguelena la que posea mayor área ($22894252,20 \text{ m}^2$), como se mencionó anteriormente y desviación estándar.

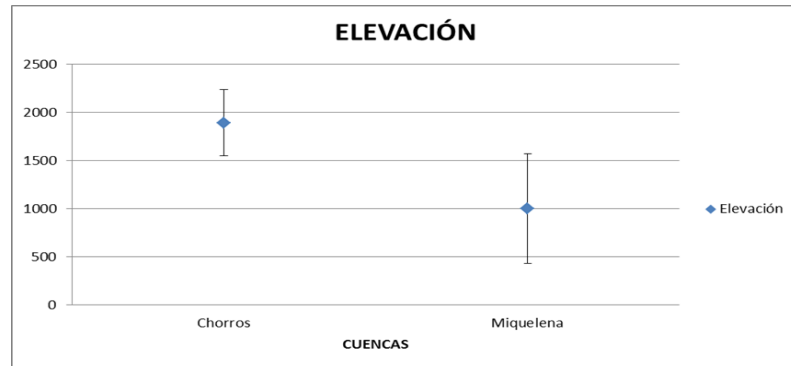


Figura 35. Valor de la Elevación (m) de las cuencas Chorros y Miquelena con su respectiva desviación estándar.

Tabla 9. Valores de Pendiente (°) de la zona.

Cuenca	Pendiente			
	media	desviación estándar	min.	máx.
Chorros	26,77	7,14	52,86	0,99
Miquelena	25,51	8,09	51,36	0,40

Tal como se puede observar en la Figura 36, al igual que la Elevación, la Pendiente (Tabla 9) es más significativa en la Cuenca Chorros, tanto su valor medio (26,77°), como mínimo (52,86°), y máximo (0,99°). Nuevamente la Cuenca Miquelena presenta una desviación estándar mayor (7,14°).

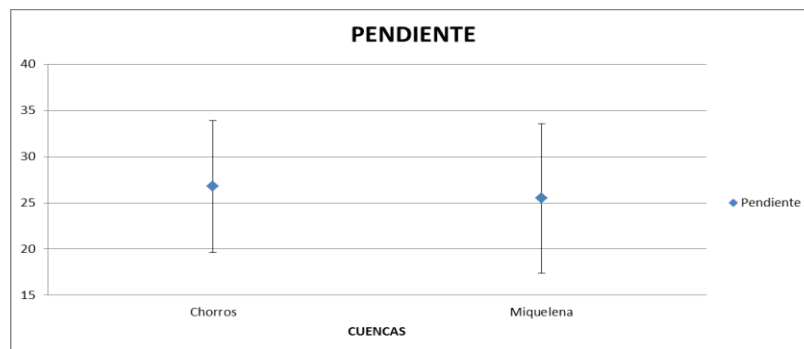


Figura 36. Valor de la Pendiente (°) de las cuencas Chorros y Miquelena con su respectiva desviación estándar.

La zona que comprende la Cuenca Miguelena es mayormente afectada por la precipitación (Tabla 10), se observa también que su valor máximo ($1970,17 \pm 299,87$) y la desviación estándar experimenta un aumento con respecto a la Cuenca Los Chorros ($1318,07 \pm 47,69$), sin embargo, es de notable atención que el valor mínimo ($803,92 \pm 299,87$ y $1119,44 \pm 47,69$ respectivamente) no responde de la misma manera.

Tabla 10. Valores del Precipitación (mm) en la zona.

	Precipitación			
Cuenca	media	desviación estándar	min.	máx.
Chorros	1190,66	47,69	1119,44	1318,07
Miguelena	1422,72	299,87	803,92	1970,17

Resultados de la dimensión fractal

A pesar de que la forma de los drenajes sea distinta, el orden como se crean los ríos puede ser muy parecidos, (orden de Strahler o Shreve). Este orden se usa para definir el tamaño de una corriente, basándose en la jerarquía de los afluentes. Las cuencas en estudio poseen un río principal y máximo entre 2 a 4 familias de tributarios, por lo tanto, sus órdenes son parecidos.

Las redes de drenajes mostradas en las figuras 37 y 38 fueron utilizadas como entrada para el cálculo de la dimensión fractal. Los valores obtenidos son resumidos en la Tabla 11. La dimensión fractal para los Chorros es de $1,2905 \pm 0,21$ y para Miguelena es de $1,4071 \pm 0,14$.

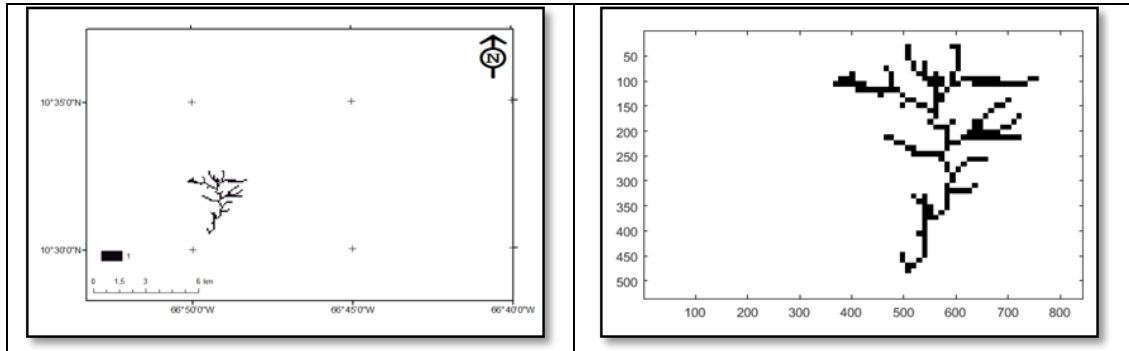


Figura 37. Red hidrográfica de la Cuenca Chorros.

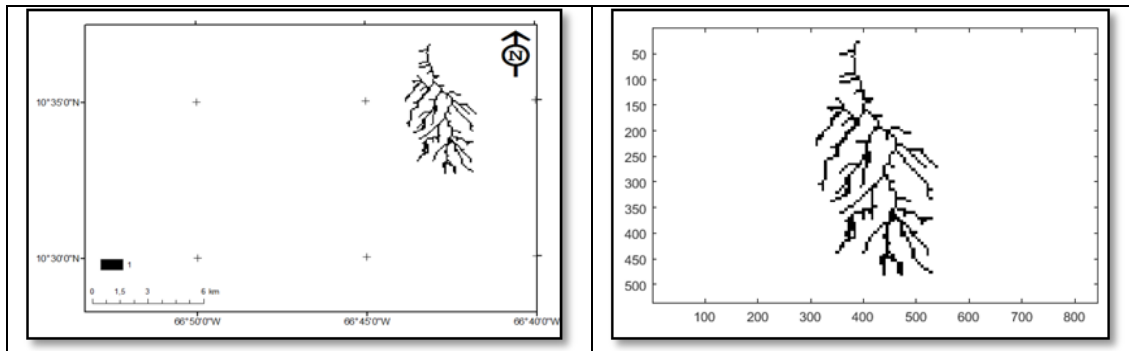


Figura 38. Red hidrográfica de la Cuenca Miguelena.

Tabla 11. Valores de la Dimensión fractal en la zona.

Cuenca	DF	
	Media	Desviación estándar
Chorros	1,2905	0,21
Miguelena	1,4071	0,14

La dimensión fractal está midiendo la relación que hay entre el afluente principal y los tributarios, al ser muy parecidas a pesar de las diferencias visuales los valores de dimensión fractal son muy cercanos entre sí. La dimensión fractal es adimensional ya que es un exponente por lo tanto no depende de unidades ni tamaños de la cuenca.

La dimensión fractal permitiría detectar anomalías en las redes de drenaje, que pudieran estar asociadas a factores tectónicos y litológicos Si dan valores de DF muy parecidos es porque nada está interrumpiendo la red de drenajes ni alterando las relaciones entre tributarios y afluentes principales.

Las Figuras 39 y 40 resumen la forma como es obtenida la dimensión fractal para la cuenca Los Chorros y la del Río Miguelena, respectivamente. La Figura 39a y 40a resulta de un recorrido que hace el algoritmo Boxcount (Moisy, 2008) sobre la imagen de cada red de drenajes para determinar la dimensión fractal. El algoritmo tiene que especificar el tipo de incremento a utilizar entre los distintos tamaños de caja (por ejemplo, lineal vs exponencial), lo que puede tener un efecto profundo en los resultados de una exploración. El drenaje en dos dimensiones (x e y) es dividido en píxeles de diferentes tamaños, para cada uno de estos el programa determina el número total de píxeles o cajas (N_0) que contempla la imagen. El programa muestra el número de cajas N necesarias para cubrir el conjunto (o imagen) como una función de R (el tamaño de los píxeles). Si el conjunto es un fractal, entonces debería observarse una ley de potencia:

$$N = N_0 R^{-DF}$$

donde DF es la dimensión fractal (capacidad de Kolmogorov), R es el tamaño de los píxeles y N_0 es el número de píxeles iniciales que conforman la imagen. De la expresión anterior es posible despejar DF, si el conjunto (o imagen) tiene algunas propiedades fractales en un rango limitado de tamaños de caja R , esto se podrá

apreciar graficando $DF = -\frac{\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)}{\ln(R)}$ para los distintos tamaños de caja.

Esto puede ser observado en las Figuras 39b y 40b, donde se calcula la dimensión fractal de los distintos grupos (tamaños de píxel), y se observa a simple

vista donde la curva azul alcanzaría un máximo local (estabilidad de puntos). En particular para la Figura 39b se observa que este máximo local es alcanzado por 4 puntos situados en tamaños de caja entre 10 y 100, esos 4 puntos tienen una altura levemente por encima de 1.4, lo cual arrojaría la dimensión fractal de la cuenca Los Chorros, análogamente para la Figura 40b. Las figuras 39c y 40c muestran otra forma de calcular la dimensión fractal de ambas cuencas, en estas figuras se grafican el logaritmo del tamaño de las cajas en el eje x ($\log(r)$), versus el logaritmo del número de cajas $\log(n(r))$, y posteriormente se calcula mediante regresión lineal la pendiente, esto es equivalente a la dimensión fractal (DF).

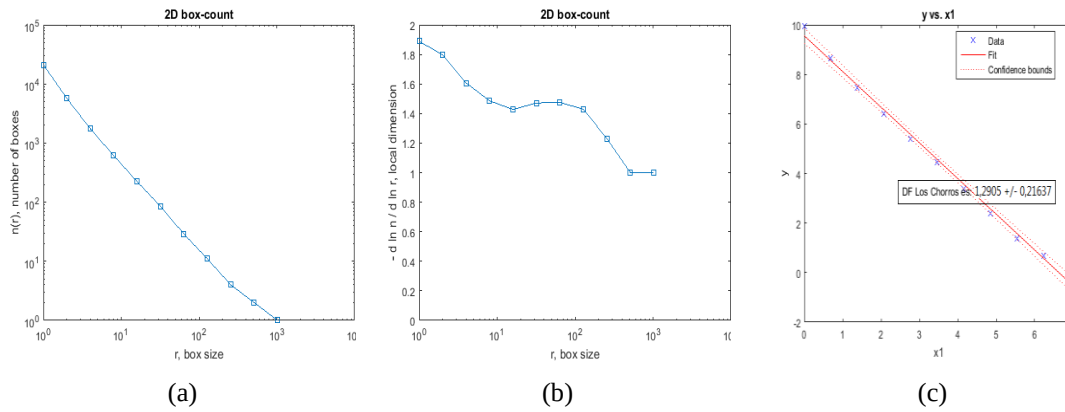


Figura 39. Cálculo de la Dimensión fractal de la Cuenca Chorros.

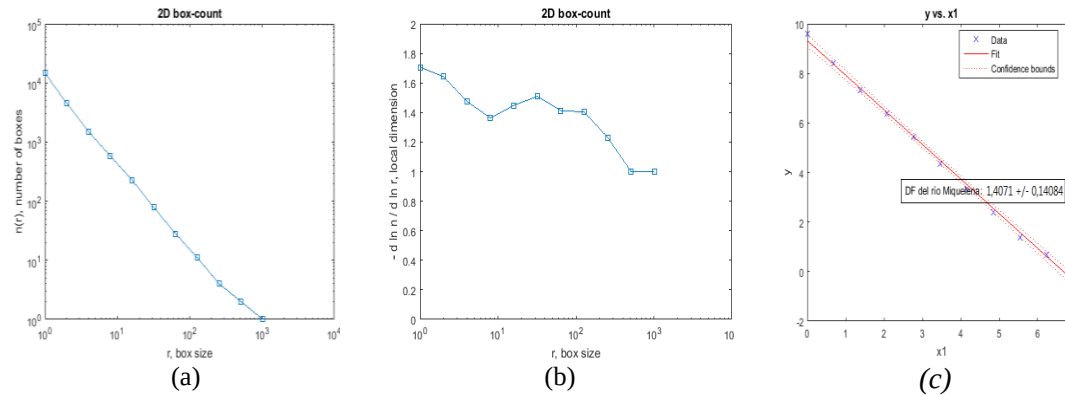


Figura 40. Cálculo de la Dimensión fractal de la Cuenca Miguelena.

Tabla 12. Valores del relieve de la zona considerando 0.5, 1, 3, 5 y 7 km de radio.

Cuenca	Chorros	Miquelena
Rel_0.5 (media)	215,02	203,88
Rel_0.5 (desv. estándar)	74,03	79,16
Rel_0.5 (max)	477	469
Rel_0.5 (min)	0	0
Rel_1k (media)	408,42	398,83
Rel_1k (desv. estándar)	142,66	151,8
Rel_1k (max)	689	798
Rel_1k (min)	20	0
Rel_3k (media)	748,44	961,14
Rel_3k (desv. estándar)	310,97	348,99
Rel_3k (max)	1543	1644
Rel_3k (min)	20	42
Rel_5k (media)	825,14	1242,53
Rel_5k (desv. estándar)	342,69	500,18
Rel_5k (max)	1665	2023
Rel_5k (min)	20	42
Rel_7k (media)	837,57	1427,2
Rel_7k (desv. estándar)	341,63	523,6
Rel_7k (max)	1775	2199
Rel_7k (min)	130	42

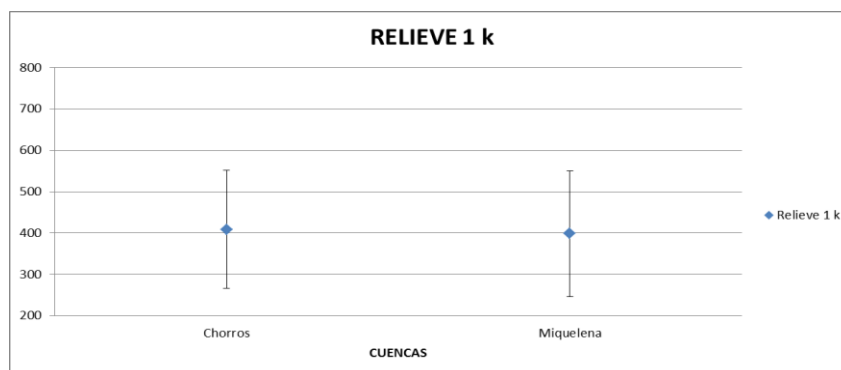


Figura 41. Valor del Relieve 1 km de radio para las cuencas Chorros y Miquelena con su respectiva desviación estándar (km).

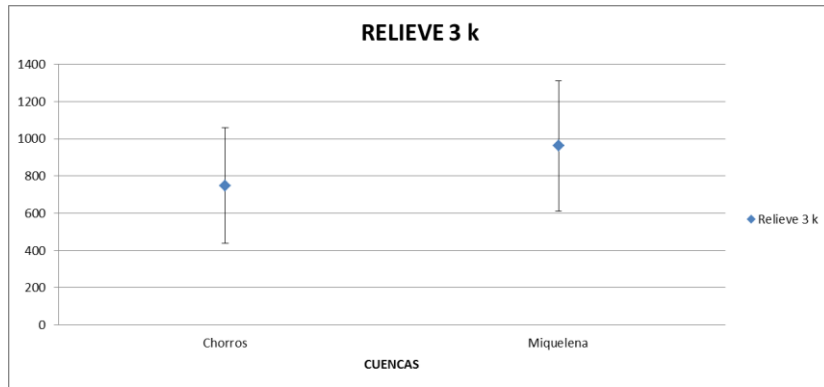


Figura 42. Valor del relieve a un radio de 3 k de las cuencas Chorros y Miquelena con su respectiva desviación estándar.

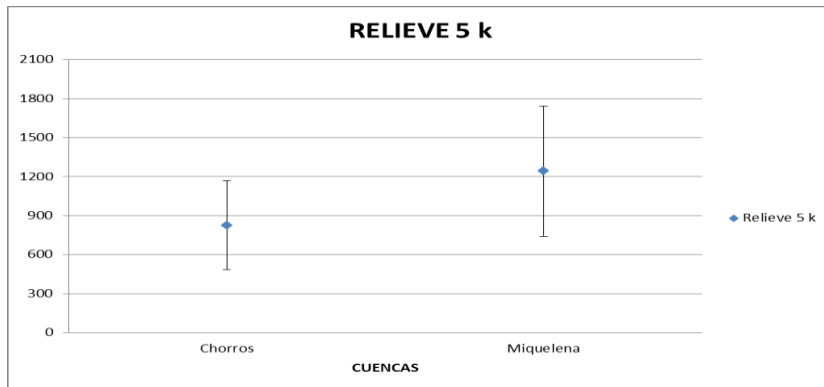


Figura 43. Valor del relieve a un radio de 5 km de las cuencas Chorros y Miquelena con su respectiva desviación estándar.

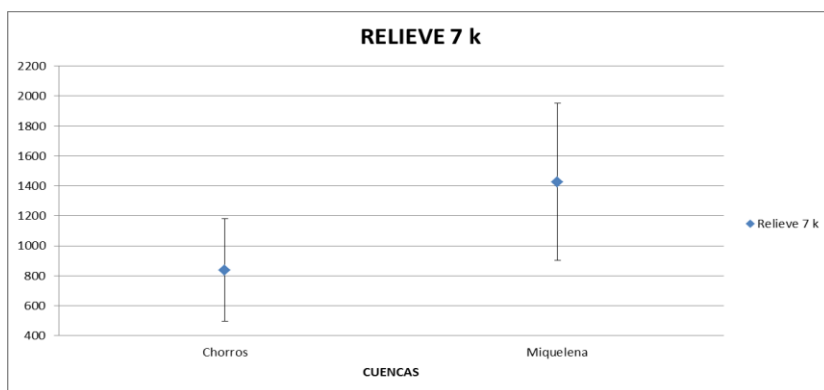


Figura 44. Valor del relieve a un radio de 7 km de las cuencas Chorros y Miquelena con su respectiva desviación estándar

Atributos Secundarios

Para estos cálculos como se mencionó anteriormente se asume que $K=1$ ya que las rocas presentes en ambas cuencas son similares.

Tabla 13. Valores del Potencial total de flujo (Joules/Km²): a) generalizado (TSP). b) con precipitación (TSPP) en la zona.

	TSP				TSPP			
Cuenca	media	desviación estándar	min.	máx.	media	desviación estándar	min.	máx.
Chorros	0,03	0,05	0,00	0,30	0,03	0,05	0,00	0,32
Miquelena	0,04	0,06	0,00	0,38	0,04	0,07	0,00	0,47

Tabla 14. Valores del Poder unitario de la corriente (Joules/Km²): a) generalizado (USP). b) con precipitación (USPP) en la zona.

	USP				USPP			
Cuenca	media	desviación estándar	min.	máx.	media	desviación estándar	min.	máx.
Chorros	0,17	0,09	0,04	0,58	0,15	0,08	0,04	0,51
Miquelena	0,18	0,10	0,02	0,58	0,16	0,09	0,02	0,48

Tabla 15. Valores del Poder de cizalla de la corriente (Joules/Km²): a) generalizado (SSP). b) con precipitación (SSPP) en la zona.

	SSP				SSPP			
Cuenca	media	desviación estándar	min.	máx.	media	desviación estándar	min.	máx.
Chorros	0,32	0,12	0,11	0,71	0,30	0,11	0,11	0,67
Miquelena	0,33	0,13	0,06	0,77	0,31	0,12	0,06	0,69

Tabla 16. Índices de Humedad: a) generalizado (IH). b) con precipitación (IHP) de la zona.

	IH				IHP			
Cuenca	media	desviación estándar	min.	máx.	media	desviación estándar	min.	máx.
Chorros	0,57	0,13	0,26	0,85	0,63	0,14	0,28	0,93
Miquelena	0,58	0,13	0,23	0,90	0,65	0,13	0,26	0,96

Tabla 17. Índices de la Capacidad de transporte de sedimentos: a) generalizado (CTS). b) con precipitación (CTSP) de la zona.

	CTS				CTSP			
Cuenca	media	desviación estándar	min.	máx.	media	desviación estándar	min.	máx.
Chorros	0,03	0,05	0,00	0,30	0,03	0,06	0,00	0,32
Miquelena	0,04	0,06	0,00	0,38	0,04	0,07	0,00	0,48

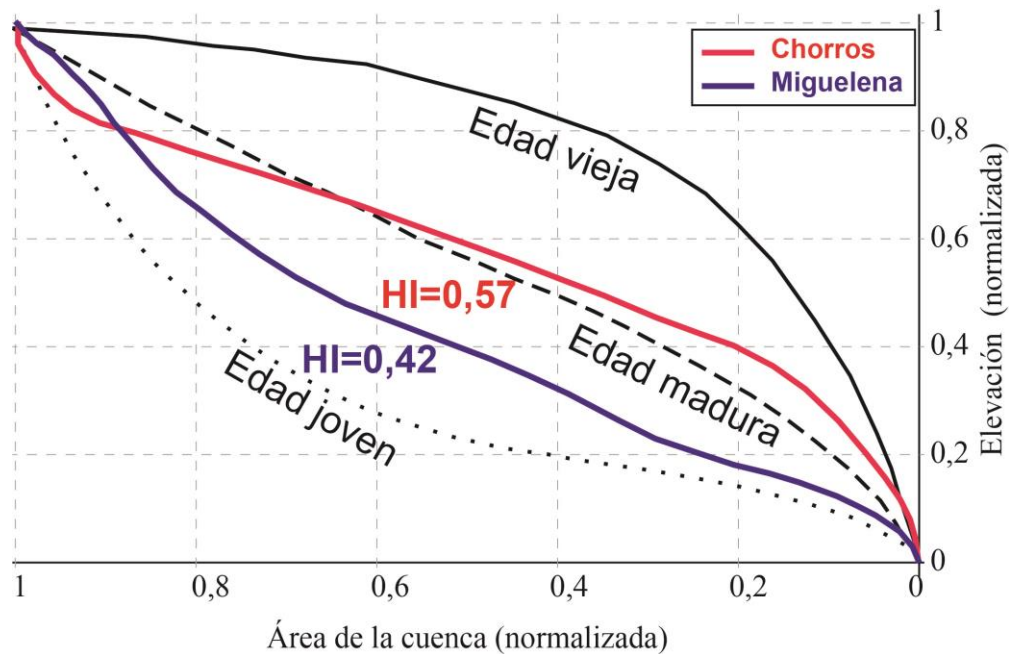


Figura 45. Comparación entre curvas hipsométricas de los Chorros (roja) y río Miguelena. Las curvas negras corresponden al concepto “Davisiano” de edad del paisaje (Strahler, 1952) y son consideradas curvas teóricas las cuales fueron colocadas como referencias.

En la Figura 45, se observan las curvas hipsométricas para la Quebrada Los Chorros y para el río Miguelena. Los valores HI de ambas cuencas se encuentran en fase de madurez, por estar en el rango de 0,3 a 0,6 ($HI=0,42$ para Miguelena y $HI=0,57$ para Los Chorros). Sobre la misma figura se han colocado las curvas teóricas (Strahler, 1952) con el fin de facilitar la interpretación de los resultados obtenidos. Se observa que la cuenca del río Miguelena yace entre las curvas hipsométricas que corresponden a edad joven y madura. En contraste, la quebrada Los Chorros se encuentra en una condición más compleja, encontrándose parte de ella entre edad joven a madura, y la otra parte entre madura y vieja. Para poder discriminar los procesos controladores del paisaje actual en el área de estudio, fue necesario extender el análisis geomorfológico cuantitativo a otras cuencas adyacentes a la zona, con la finalidad de cubrir un bloque que sea representativo estadísticamente y geológicamente.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Introducción

En el presente capítulo se presentan los distintos mapas de los atributos primarios y secundarios para las cuencas de estudio, además de una discusión detallada de los resultados es función del clima y la tectónica dominante del área de estudio. Es importante destacar que, debido a la ampliación de la zona de estudio, las cuencas fueron numeradas para el norte como 1N, 2N, 3N, 4N y 5N esta última es el río Miguelena y para el flanco sur: 1S (Quebrada Los Chorros), 2S, 3S, 4S, 5S y 6S

5.2 Discriminación de los Procesos Controladores del Paisaje Actual de las cuencas en estudio

En la Figura 46 se demarcó la cuenca del río Miguelena en color fucsia y la del río Tócome en color naranja, respectivamente. Se calcularon los distintos parámetros geomorfológicos para todas las cuencas del flanco norte 1N, 2N, 3N, 4N y Miguelena para el flanco norte de la cordillera, así como las del flanco sur: Quebrada los Chorros (1S), 2S, 3S, 4S, 5S, y 6S. Se observa en esta figura que la litología es muy similar a excepción de las cuencas 1N y 2S.

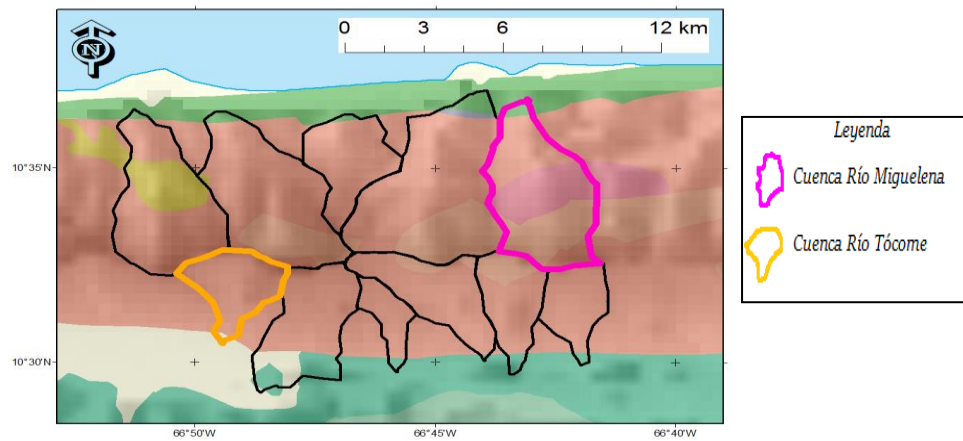


Figura 46. Mapa de unidades geológicas de la zona de estudio (Hackley et al., 2006)

En la Figura 47 y la Figura 48 se puede observar que la sismicidad registrada en la zona de estudio para el intervalo de tiempo 1911-2011 es muy escasa sobre todo para el flanco norte de la cordillera. A pesar de que existan datos históricos (FUNVISIS, 2004) para antes de 1911, estos no pueden ser utilizados para estimar la energía sísmica ya que poseen errores en cuanto a la ubicación de los sismos y a las magnitudes de los mismos. Esta sismicidad no llega a afectar las cuencas de ese flanco, en contraste las cuencas del flanco sur si pudieran estar afectadas por la actividad sísmica de las fallas, principalmente por el sistema de fallas de La Victoria (ubicada en la zona roja del mapa).

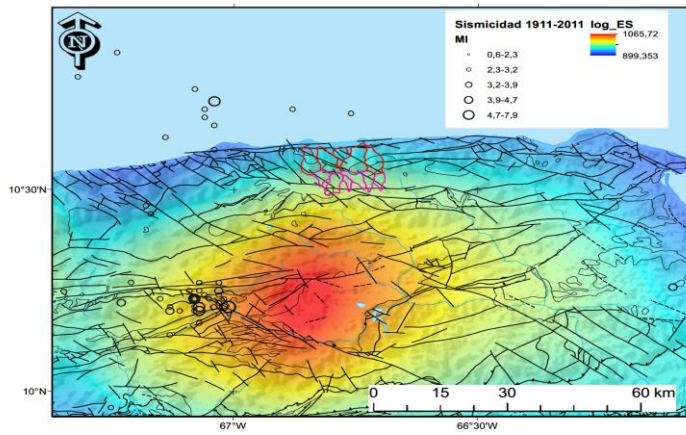


Figura 47. Sismicidad entre 1911 a 2011, energía sísmica y fallas existentes en el bloque central de la Cordillera de La Costa

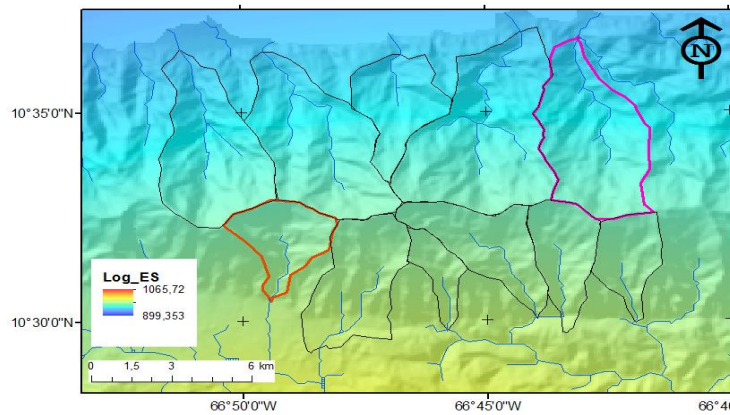


Figura 48. Mapa del Logaritmo de la Energía Sísmica liberada para el período 1911 a 2011(calculada en este trabajo), se prefirió dejar la escala en logaritmos para poder establecer diferencias entre ambos flancos.

$$\log_{10} E_R \text{ (joules)} \approx 4.8 + 1.5 M_S$$

En cuanto al patrón de precipitaciones, se observa en la Figura 49 un efecto de barrera orográfica, en donde las cuencas ubicadas en el flanco norte reciben una mayor precipitación que las del flanco sur. El promedio de precipitaciones para el flanco norte es de 1,54 m en el intervalo de tiempo 1998-2009 (Bookhagen, 2010), mientras que para el mismo período el flanco sur tiene un promedio de 0,94 m.

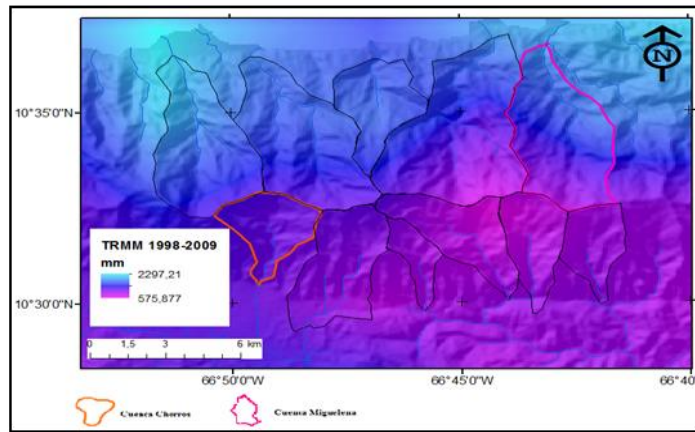


Figura 49. Mapa de Precipitación en la zona. Modelo TRMM 1998-2009 (Bookhagen, 2010).

La Figura 50 muestra el mapa de índices de humedad con precipitación para las distintas cuencas, los índices promedios entre las cuencas ubicadas en el flanco norte y las del sur son muy parecidas, esto se debe a que la diferencia en términos de la zona es muy pequeña, es decir, es homogénea en cuanto a litología y sus áreas son similares a Km^2 , por lo tanto, la capacidad para absorber agua es muy parecida.

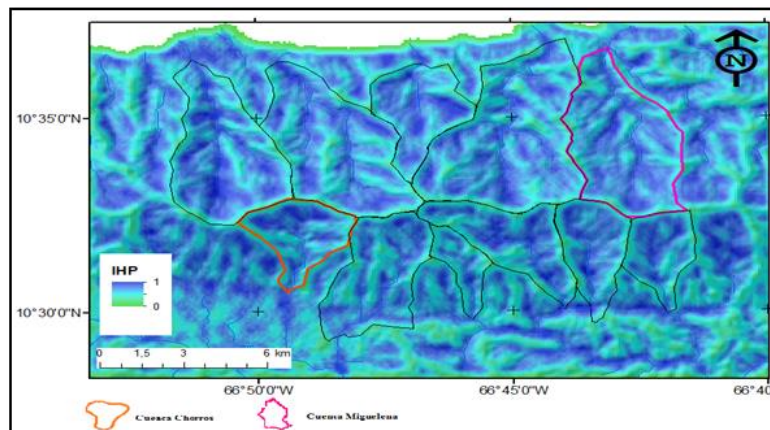


Figura 50. Mapa de los Índices de Humedad con precipitación (IHP) de la zona

En la Figura 51 se presenta el mapa de elevaciones para el área de estudio, las cuencas del flanco norte tienen una elevación promedio de 1094,66 metros, mientras que las del flanco sur tienen una elevación promedio de 1662,36 metros. La cuenca del río Miguelena tiene una elevación promedio de 1002,22 metros mientras que la del río Tócome representa la cuenca con mayor elevación para el flanco sur con un valor promedio de 1892,91 metros. Notándose una diferencia significativa entre las elevaciones de ambos flancos.

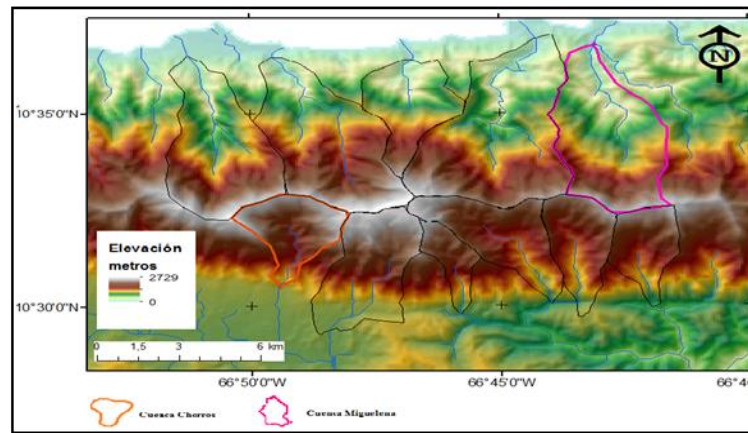


Figura 51. Mapa de Elevación de la zona.

En términos de pendiente, puede observarse en la Figura 52 que el flanco norte tiene mayor pendiente promedio ($27,348^\circ$) que las del flanco sur ($25,17^\circ$). Entre el río Tócome y el Miguelena, la cuenca del río Tócome tiene una pendiente de $26,77^\circ$ mientras que la cuenca del segundo tiene una pendiente de $25,51^\circ$.

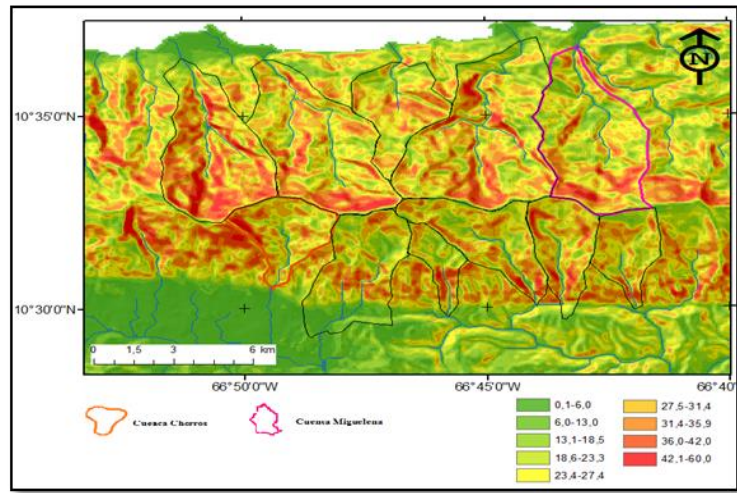


Figura 52. Mapa de Pendientes (°) de la zona.

En la Figura 53 se observan los mapas de potencial total de flujo TSP y TSPP para las distintas cuencas. Se determinó que el potencial total de flujo promedio en el flanco norte es mayor que para las cuencas ubicadas en el flanco sur.

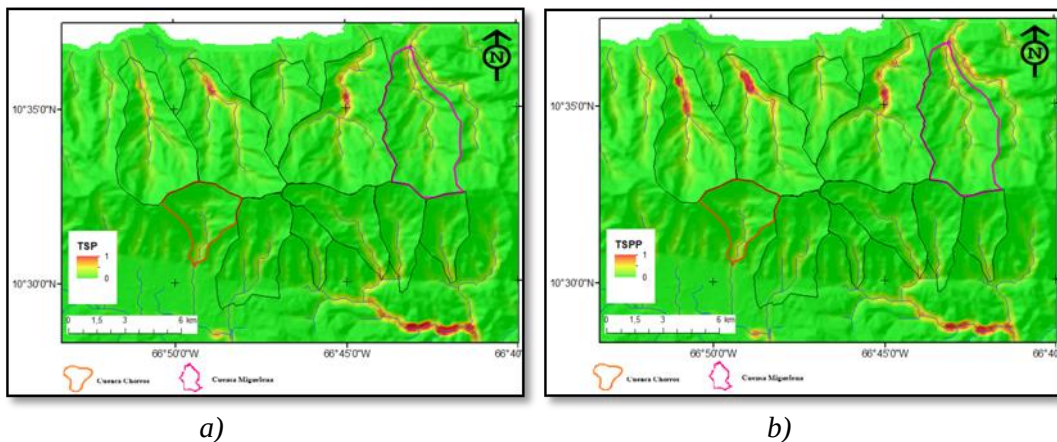


Figura 53. Mapa del Potencial total de flujo (m^2): a) generalizado (TSP). b) con precipitación (TSPP) en la zona.

En la Figura 54 se observan los mapas de poder unitario de la corriente USP y USPP para las distintas cuencas. Se determinó que la erosión promedio en el flanco norte ($0,245 \text{ Joules/Km}^2$) es mayor que para las cuencas ubicadas en el flanco sur ($0,219 \text{ Joules/Km}^2$). Sin embargo, en las cuencas de los ríos Miguelena y Tócome presentan similares valores de USPP.

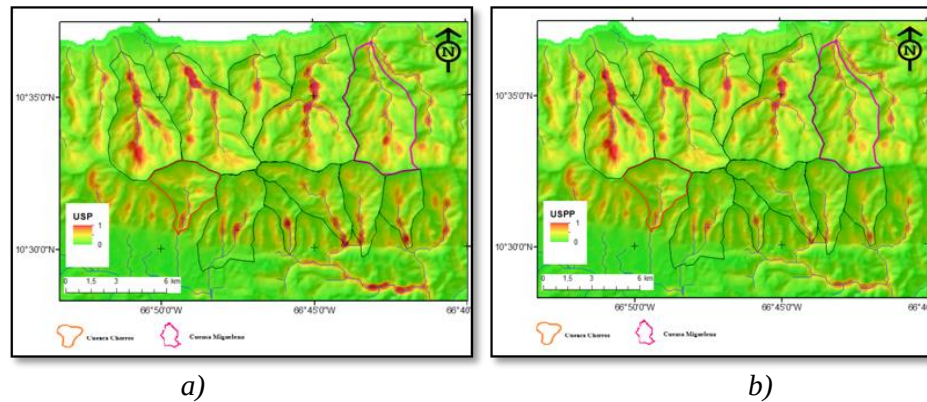


Figura 54. Mapa del Poder unitario de la corriente (m^2): a) generalizado (USP). b) con precipitación (USPP) en la zona

En la Figura 55 se observan los mapas de índice de erosión SSP y SSPP para las distintas cuencas. Se determinó que la erosión promedio en el flanco norte es mayor ($0,348 \text{ Joules/Km}^2$) que para las cuencas ubicadas en el flanco sur ($0,265 \text{ Joules/Km}^2$). Sin embargo, en las cuencas de los ríos Miguelena y Tócome presentan similares valores de SSPP.

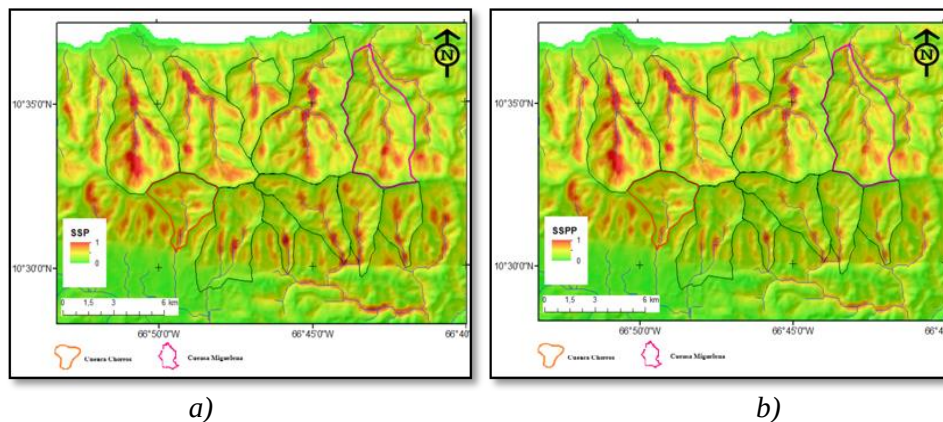


Figura 55. Mapa del Poder de cizalla de la corriente (m^2): a) generalizado (SSP). b) con precipitación (SSPP) en la zona.

Como se pudo observar, el color verde indicó menor erosión y rojo indicó mayor erosión, esto significa que hubo mayor acumulación de erosión en la cuenca Miguelena, es decir que el grado de incisión fluvial es mayor en ese río que en el otro. Este mapa al encontrarse normalizado facilita las observaciones, además de que permite establecer diferencias cualitativas.

La Figura 56 muestra los mapas de capacidad de transporte de sedimentos para las distintas cuencas, se observan que los ríos del flanco norte tienen un mayor poder erosivo que aquellos ubicados en el flanco sur. Esto se debe a que la pendiente promedio en las cuencas del flanco norte son mayores ($27,348^\circ$) que las del flanco sur ($25,17^\circ$). Sin embargo, al tener las cuencas del flanco norte menor elevación y mayor pendiente se facilita la erosión y por ende el transporte de sedimentos desde las cabeceras de las cuencas.

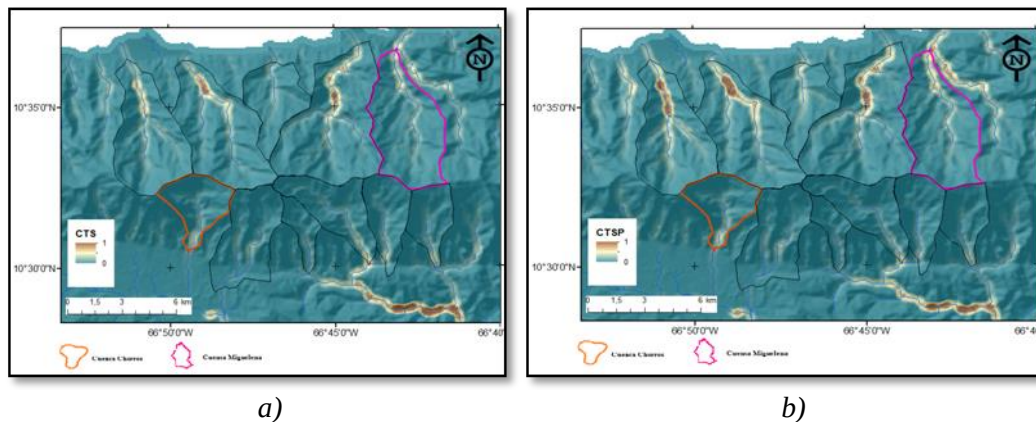


Figura 56. Mapa de los índices de la Capacidad de transporte de sedimentos a) generalizado (CTS). b) con precipitación (CTSP) de la zona.

La Figura 57 muestra el mapa del Poder de Cizalla de la corriente con precipitación. Fallas presentes en la zona, además una comparación de la mineralogía encontrada en la cuenca solo para un tipo de amperaje (Fracción Amp 0,6).

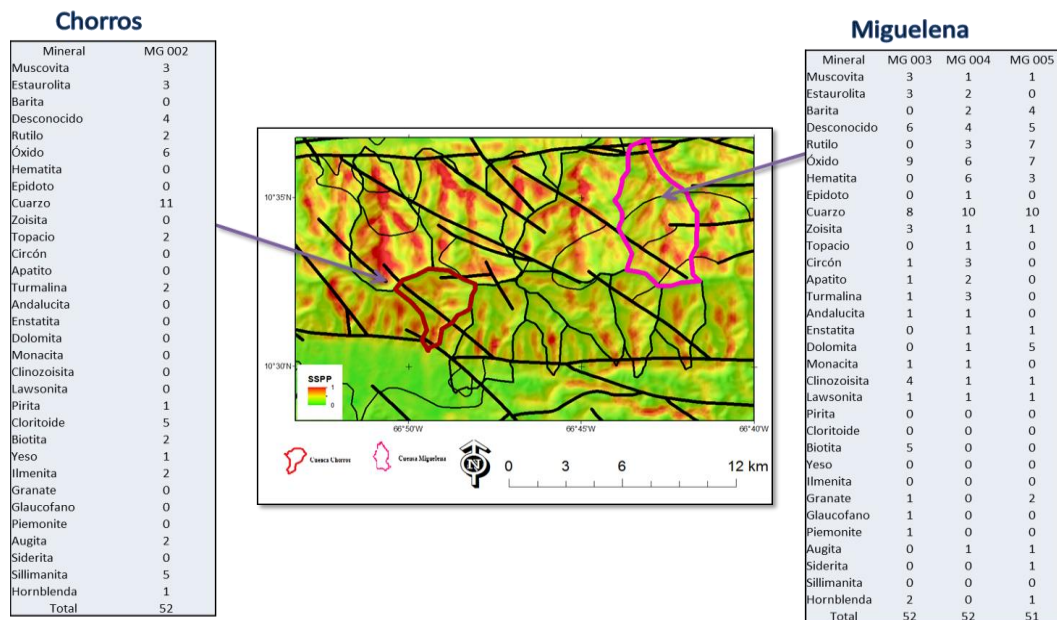


Figura 57. Mapa del Poder de cizalla de la corriente con precipitación y fallas presentes en la zona, junto con la distribución de minerales pesados en tales cuencas.

En cuanto a la comparación de las curvas hipsométricas para Los Chorros y río Miguelena (Figura 45, capítulo anterior), es importante destacar lo siguiente: el área bajo la curva roja (Los Chorros) arroja un valor de $HI=0,57$, a diferencia de la curva azul (Miguelena) que proporciona un valor de $HI=0,42$, de acuerdo con estos valores y los rangos establecidos por Strahler (1952), Sharma et al. (2013) y Bustos et al. (2013) ambas cuencas estarían en fase de madurez.

5.3 Discriminación de agentes controladores del relieve mediante correlaciones

Con la finalidad de discriminar los posibles agentes controladores del relieve se realizó un estudio de coeficientes de correlación de Pearson para las distintas variables morfométricas, para esto fue necesario ampliar la zona de estudio a cuatro cuencas para el flanco norte, y cinco cuencas para el flanco sur adicionales a las cuencas Miguelena y Chorros respectivamente, los valores obtenidos para los distintos atributos primarios y secundarios del terreno son resumidos en la Tabla 18.

A partir de esta tabla se realizó el estudio de coeficientes de correlación mencionado anteriormente.

Es importante destacar que los procesos geológicos y climáticos varían dependiendo de la escala, a veces se comportan igual en todas las escalas, recibe el nombre de autosimilaridad y se estudian con fractales; otras veces cambian y el proceso que controla a una escala muy local no puede ser extrapolado a una escala mayor.

Cabe resaltar que se deben hacer los cálculos a varias escalas y más aún el relieve porque este de alguna manera representa el paisaje. Eso se calculó hallando para cierto radio (0.5, 1, 3, 5 y 7 km) el máximo de las alturas, luego a ese valor máximo se le restó las elevaciones y resultó justo el espacio que queda o que se ha ido en una zona, eso es llamado relieve geofísico. Los radios (0.5, 1, 3, 5 y 7 km) se utilizaron para ver el control de diferentes procesos a varias escalas y luego se seleccionó el radio a 1 km y 7 km porque son representativos de escalas pequeñas y de escalas grandes.

A continuación, se presentan en las Figuras 58 a 75 un estudio de regresión lineal entre las distintas variables analizadas para las cuencas, sólo se presenta aquella información que es de interés y que puede arrojar indicios sobre los posibles agentes controladores del paisaje.

Tabla 18. Atributos primarios y secundarios promedios (parámetros geomorfológicos cuantitativos) para las cuencas ubicadas en los flancos norte y sur. Todos los índices de erosión con precipitación fueron calculados asumiendo la precipitación en metros para no y posteriormente fueron normalizados.

Cuenca	Pendiente (°)	Elevación (m)	HI	Rel 0.5	Rel 1k	Rel 3k	Rel 5k	Rel 7k	TSPP (Joules/Km²)	USPP (Joules/Km²)	SSPP (Joules/Km²)	IHP	CTSP	DF	Prec (m)	SE (J)
1N	31,00	1212,57	0,84	260,77	493,32	1044,68	1453,42	1453,42	0,07	0,24	0,41	0,67	0,07	1,40	1,72	4,57E+09
2N	27,70	1323,74	0,92	222,41	423,61	966,24	1389,87	1389,87	0,07	0,20	0,35	0,64	0,07	1,22	1,56	4,93E+09
3N	25,92	837,34	0,54	209,79	423,95	1154,63	1891,65	1891,65	0,04	0,19	0,35	0,66	0,04	1,22	1,67	5,01E+09
4N	26,61	1097,44	0,73	211,90	408,21	951,77	1566,28	1566,28	0,05	0,17	0,32	0,63	0,05	1,29	1,31	5,01E+09
Miquelena (5N)	25,51	1002,22	0,42	203,88	398,83	961,14	1242,53	1427,20	0,04	0,16	0,31	0,65	0,04	1,41	1,42	4,93E+09
Chorros (1S)	26,77	1892,91	0,57	215,02	408,42	748,44	825,14	837,57	0,03	0,15	0,30	0,63	0,03	1,29	1,19	6,52E+09
2S	20,83	1592,38	0,88	171,23	353,90	875,10	1136,02	1136,02	0,02	0,12	0,24	0,63	0,02	1,31	1,03	6,63E+09
3S	25,07	1668,57	1,13	195,51	379,59	895,09	1060,43	1060,43	0,03	0,13	0,25	0,58	0,03	1,11	0,91	7,72E+09
4S	25,86	1652,76	0,89	202,08	361,05	755,03	1076,17	1076,17	0,03	0,12	0,26	0,62	0,03	1,25	0,83	6,63E+09
5S	27,21	1552,17	1,11	211,24	373,07	682,77	1081,00	1081,00	0,02	0,13	0,27	0,63	0,02	1,37	0,79	7,58E+09
6S	25,29	1615,38	1,43	195,54	363,96	680,18	719,86	719,86	0,03	0,14	0,27	0,62	0,03	1,30	0,91	6,35E+09

5.3.1 FLANCO NORTE

La Figura 58 indica que hay correlación ($r=0,76$; $R^2=0,58$) entre el relieve a 1 km y el patrón de precipitaciones

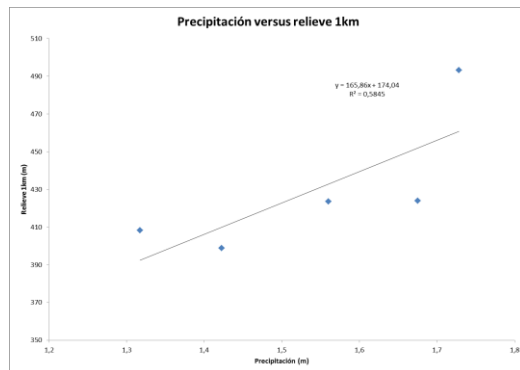


Figura 58. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 1km y precipitaciones para el período (1998-2009) para el flanco norte

Cuando el radio de relieve se incrementa a 7 km esta correlación se pierde, tal como se ilustra en la Figura 59 ($r=0,25$; $R^2=0,06$) sugiriendo que el control de las precipitaciones sobre el relieve para el flanco norte es local.

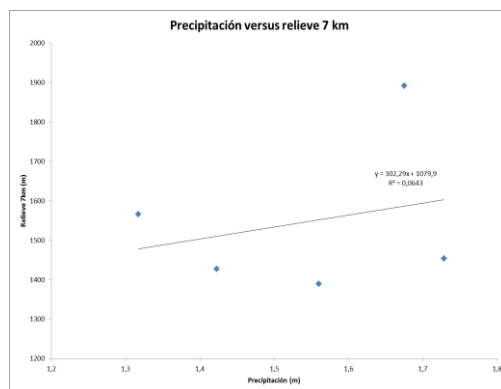


Figura 59. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 7km y precipitaciones para el período (1998-2009) para el flanco norte

Comportamientos similares se observan cuando se compara los índices de erosión (SSPP) que incluyen precipitación con el relieve (Figuras 60 y 61), así los procesos de incisión de ríos afectan el relieve localmente, pero al parecer cuando se incrementa el radio del relieve ese control aparentemente disminuye.

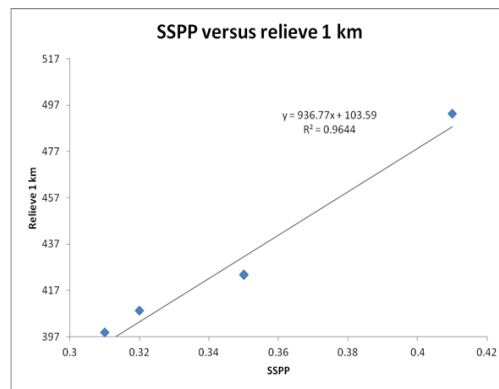


Figura 60. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 1 km y SSPP para el flanco norte

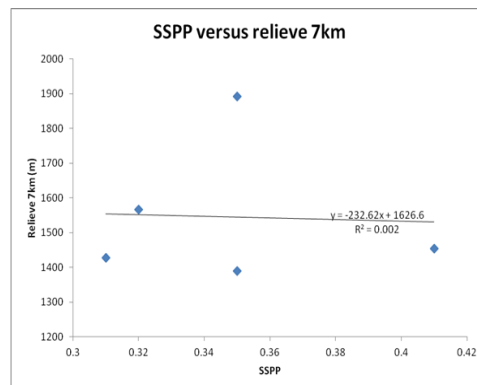


Figura 61. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 7km y SSPP para el flanco norte

En cuanto a la sismicidad, las Figuras 62 y 63 sugieren que el control ejercido por la sismicidad sobre el relieve a 1 km y a 7 km pareciera ser muy pobre o nulo, esto se debe a que la cantidad de sismos existentes para esta zona es insuficiente.

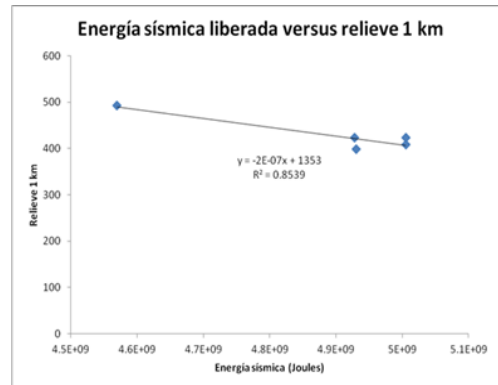


Figura 62. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 1km y energía sísmica liberada para el flanco norte

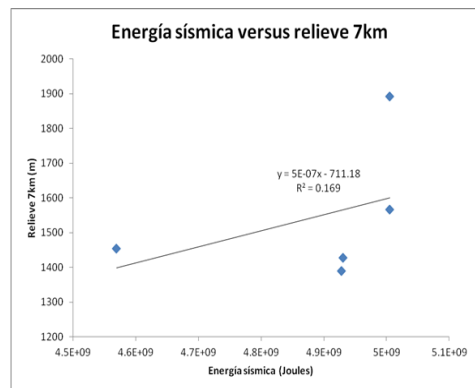


Figura 63. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 7km y energía sísmica liberada para el flanco norte

Las correlaciones anteriormente mostradas son resumidas en forma de coeficientes de correlación de Pearson en la Tabla 19 para el flanco norte. En esta tabla el color rojo indica anticorrelación, el color azul indica correlación importante y los números sin color en cursiva corresponden a correlaciones esperadas o triviales entre las variables, es decir, que una variable se puede obtener de la otra.

Tabla 19. Correlaciones entre diversas variables geomorfológicas cuantitativas para el flanco Norte del área de estudio

	Pendiente (°) media	Elevación (m)	HI	Rel 0.5	Rel 1k	Rel 3k	Rel 5k	Rel 7k	TSPP (Joules/Km ²)	USPP (Joules/Km ²)	SSPP (Joules/Km ²)	IHP	CTSP	Prec (m)	SE
Elevación (media)	0,63	1													
HI	0,71	0,86	1												
Rel_0.5 (media)	0,99	0,55	0,64	1											
Rel_1k (media)	0,95	0,37	0,52	0,98	1										
Rel_3k (media)	0,05	-0,60	-0,23	0,13	0,34	1									
Rel_5k (media)	-0,16	-0,59	-0,10	-0,12	0,05	0,81	1								
Rel_7k (media)	-0,38	-0,81	-0,41	-0,32	-0,12	0,83	0,95	1							
TSPP (media)	0,84	0,92	0,94	0,79	0,67	-0,24	-0,31	-0,58	1						
USPP (media)	0,93	0,47	0,65	0,95	0,97	0,36	0,09	-0,12	0,77	1					
SSPP (media)	0,92	0,36	0,56	0,94	0,98	0,43	0,15	-0,04	0,69	0,99	1				
IHP (media)	0,50	-0,22	-0,13	0,59	0,73	0,69	0,18	0,21	0,10	0,66	0,73	1			
CTSP (media)	0,84	0,92	0,94	0,79	0,67	-0,24	-0,31	-0,58	1,00	0,77	0,69	0,10	1		
Prec. (media)	0,58	0,02	0,24	0,64	0,76	0,74	0,34	0,25	0,38	0,82	0,85	0,86	0,38	1	
SE	-0,92	-0,45	-0,41	-0,95	-0,92	-0,08	0,30	0,41	-0,65	-0,84	-0,86	-0,69	-0,65	-0,6	1

5.3.2 FLANCO SUR

Cuando se compara nuevamente la precipitación versus el relieve a 1 km y a 7 km para las cuencas del flanco sur, se observa en la Figura 64 y 65 que a medida que incrementa el relieve el efecto de la precipitación disminuye, se obtiene una correlación débil entre precipitación y relieve a 1 km ($r = 0,59$ o $R^2 = 0,35$), cuando se considera un relieve de 7 km estas correlaciones se hacen negativas ($r = -0,34$ ó $R^2 = 0,11$).

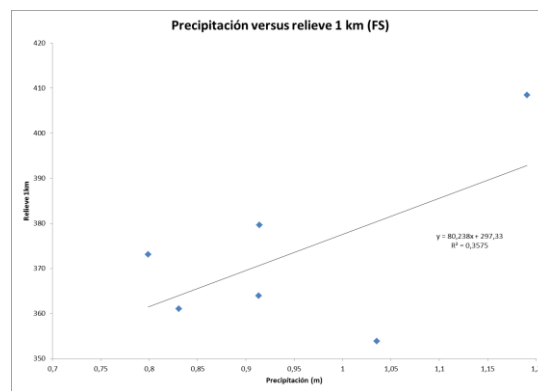


Figura 64. *Dispersión y regresión lineal entre relieve a 1km y precipitaciones para el período (1998-2009) para el flanco sur*

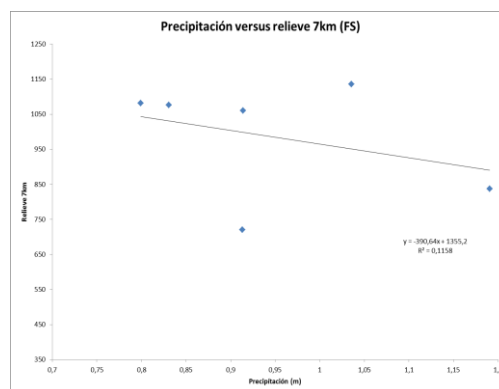


Figura 65. *Dispersión y regresión lineal entre relieve a 7km y precipitaciones para el período (1998-2009) para el flanco sur*

Cuando se comparan los índices de erosión con precipitación (SSPP) con el relieve se observa en la Figura 66 y 67 un comportamiento similar al de las precipitaciones con el relieve, existiendo una fuerte correlación entre SSPP con relieve a 1 km ($r=0,81$ ó $R^2=0,65$). Esta correlación se hace negativa al incrementar el radio del relieve a 7 km ($r = -0,65$ ó $R^2=0,43$).

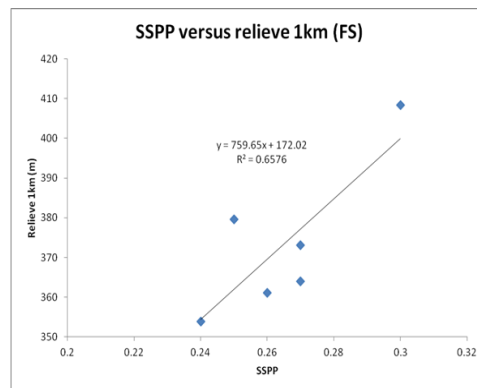


Figura 66. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 1 km y SSPP para el flanco sur

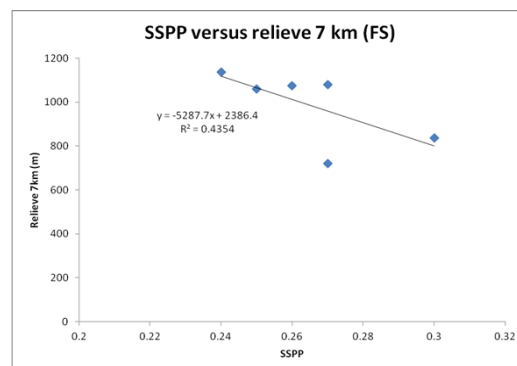


Figura 67. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 7km y SSPP para el flanco sur

Al tratar de discriminar el grado de control de la sismicidad sobre el relieve se observa en la Figura 68 y 69 que a medida de que se incrementa el relieve a 7 km esta correlación mejora pasando de $R^2=0,01$ ($r=0,09$) para relieve de 1 km de radio hasta $R^2=0,28$ ($r=0,54$) para un relieve de radio 7 km, así la sismicidad pareciera no

ejercer un control local sobre las cuencas a nivel global. Sin embargo aquellas cuencas que están más cerca de fallas activas si pudieran estar siendo afectadas.

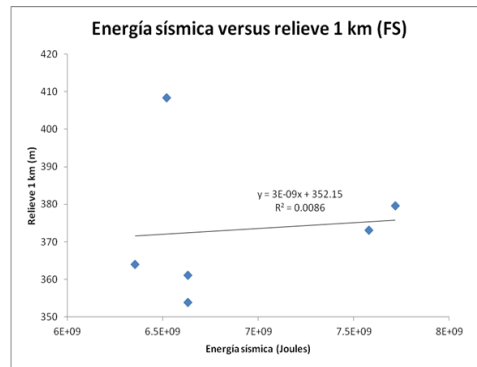


Figura 68. *Dispersión y regresión lineal entre relieve a 1km y energía sísmica liberada para el flanco sur*

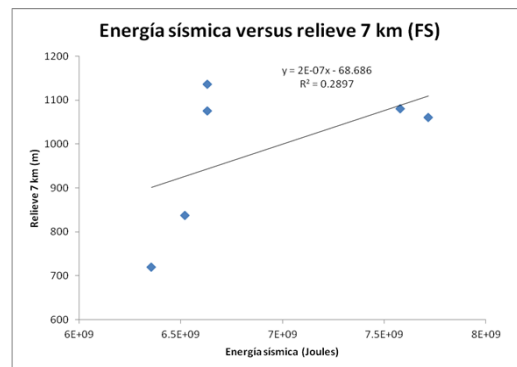


Figura 69. *Dispersión y regresión lineal entre relieve a 7km y energía sísmica liberada para el flanco sur*

Finalmente en la Tabla 20 se resumen otras correlaciones entre los distintos parámetros de las cuencas del flanco sur. En esta tabla el color rojo indica anticorrelación, el color azul indica correlación importante y los números sin color en cursiva corresponden a correlaciones esperadas o triviales entre las variables, es decir, que una variable se puede obtener de la otra.

Tabla 20. Correlaciones entre diversas variables geomorfológicas cuantitativas para el flanco Sur del área de estudio

	Pendiente (°)	Elevación (m)	HI	Rel 0.5	Rel 1k	Rel 3k	Rel 5k	Rel 7k	TSPP (Joules/Km²)	USPP (Joules/Km²)	SSPP (Joules/Km²)	IHP	CTSP	Prec (m)	SE
HI	0,01	-0,69	1												
Rel_0.5	0,98	0,47	-0,20	1											
Rel_1k	0,59	0,86	-0,52	0,71	1										
Rel_3k	-0,66	0,04	-0,25	-0,62	-0,11	1									
Rel_5k	-0,36	-0,45	-0,21	-0,36	-0,41	0,55	1								
Rel_7k	-0,35	-0,43	-0,24	-0,34	-0,39	0,55	1,00	1							
TSPP	0,39	0,58	0,02	0,36	0,39	-0,05	-0,58	-0,57	1						
USPP	0,52	0,70	-0,12	0,59	0,81	-0,42	-0,84	-0,83	0,44	1					
SSPP	0,73	0,72	-0,36	0,83	0,81	-0,63	-0,68	-0,66	0,37	0,87	1				
IHP	-0,01	0,02	-0,34	0,09	-0,05	-0,56	-0,13	-0,13	-0,47	0,10	0,37	1			
CTSP	0,39	0,58	0,02	0,36	0,39	-0,05	-0,58	-0,57	1,00	0,44	0,37	-0,47	1		
Prec.	-0,23	0,79	-0,66	-0,04	0,60	0,26	-0,36	-0,34	0,16	0,57	0,43	0,22	0,16	1	
SE	0,24	-0,31	0,21	0,17	0,09	0,28	0,54	0,54	-0,26	-0,23	-0,28	-0,57	-0,26	-0,46	1

5.3.3 AMBOS FLANCOS

Cuando se compara a nivel global ambos flancos se observa en las Figuras 70 y 71, que las precipitaciones controlan el relieve de radio 1 km, ($r=0,86$ ó $R^2=0,74$) cuando se aumenta el radio del relieve a 7 km, a pesar de que disminuye un poco la correlación se sigue observando esta misma tendencia ($r=0,76$ ó $R^2=0,59$).

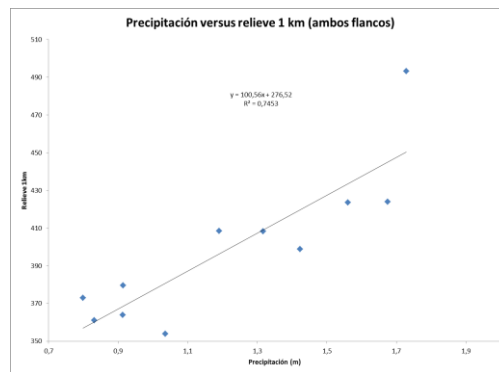


Figura 70. *Dispersión y regresión lineal entre relieve a 1km y precipitaciones para el período (1998-2009) para ambos flancos*

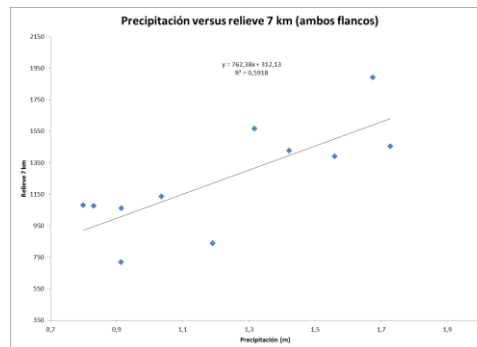


Figura 71. *Dispersión y regresión lineal entre relieve a 7km y precipitaciones para el período (1998-2009) para ambos flancos*

En cuanto a los procesos de incisión o erosión de ríos, las Figuras 72 y 73 muestran que a medida de que se incrementa el radio (radio 1 y 7) de relieve el control que ejerce el índice de erosión disminuye ($R^2=0,74$ y $R^2=0,59$), así estos procesos de incisión de ríos corresponderían a procesos inherentes a la cuenca en

particular (pendiente, elevación, tasa de precipitaciones, grado de meteorización, nivel de fallamiento, entre otros). Estos procesos individuales de la cuenca son denominados *procesos locales*.

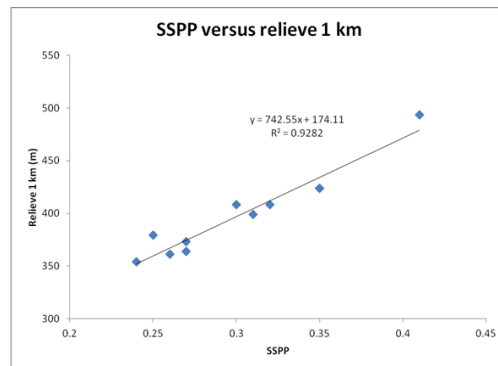


Figura 72. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 1 km y SSPP para ambos flancos

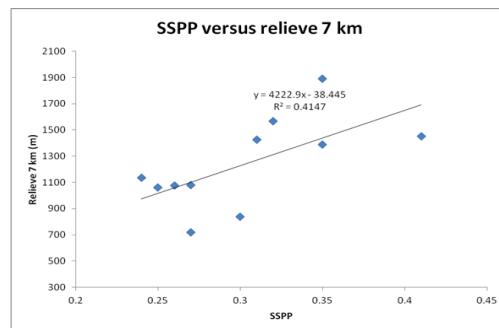


Figura 73. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 7km y SSPP para ambos flancos

En las Figuras 74 y 75 se aprecia mediante correlaciones negativas que la sismicidad no ejerce ningún control sobre el relieve de radio 1 y 7 km respectivamente, siendo las correlaciones de $R^2=0,52$ ($r=0,72$) y $R^2= 0,50$ ($r=0,71$).

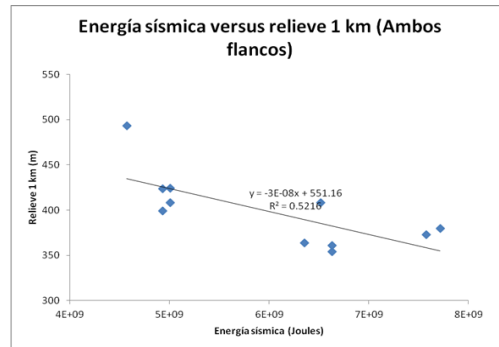


Figura 74. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 1km y energía sísmica liberada para ambos flancos

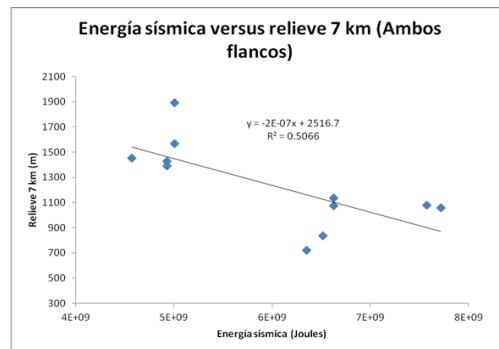


Figura 75. Dispersión y regresión lineal entre relieve a 7km y energía sísmica liberada para ambos flancos

5.4 Comparación de ambos flancos en términos de la dimensión fractal (DF)

La Tabla 21 resume los valores de dimensión fractal (DF) y los errores obtenidos para las cuencas de los flancos sur y norte.

Tabla 21. Valores de dimensión fractal (DF) y errores asociados para las cuencas del flanco norte y sur (ver Figura 47 para la ubicación de las cuencas).

Cuenca	DF	error	Cuenca	DF	error
1N	1,3955	0,3033	1S (Chorros)	1,2905	0,2164
2N	1,2248	0,4041	2S	1,3124	0,2361
3N	1,2154	0,3862	3S	1,1109	0,2855
4N	1,2943	0,4055	4S	1,2515	0,2389
5N (Miguelena)	1,4071	0,1408	5S	1,3666	0,5084
Promedio	1,3074	0,3280	6S	1,3047	0,2072
			Promedio	1,2728	0,2952

Los valores resumidos en la Tabla 21 pueden ser observados en la Figura 76, en la cual se aprecian los valores de dimensión fractal (DF) obtenidos para las cuencas del flanco norte (azules) y para las del flanco sur (rojas). Se observa que cuando se consideran los errores de la dimensión fractal no hay diferencias significativas entre los valores arrojados por las distintas cuencas para ambos flancos. El promedio de la dimensión fractal para las cuencas del flanco norte es de $1,3074 \pm 0,3280$, mientras que para el flanco sur es de $1,2728 \pm 0,2952$, así estos valores están indicando autosimilaridad en las redes de drenajes de ambos flancos, y por lo tanto los parámetros controladores del relieve (precipitaciones) sobre cuencas son los mismos. De acuerdo con la sección anterior, sería el clima quien estaría ejerciendo un mayor control sobre el relieve actual de este sector de la Cordillera de La Costa.

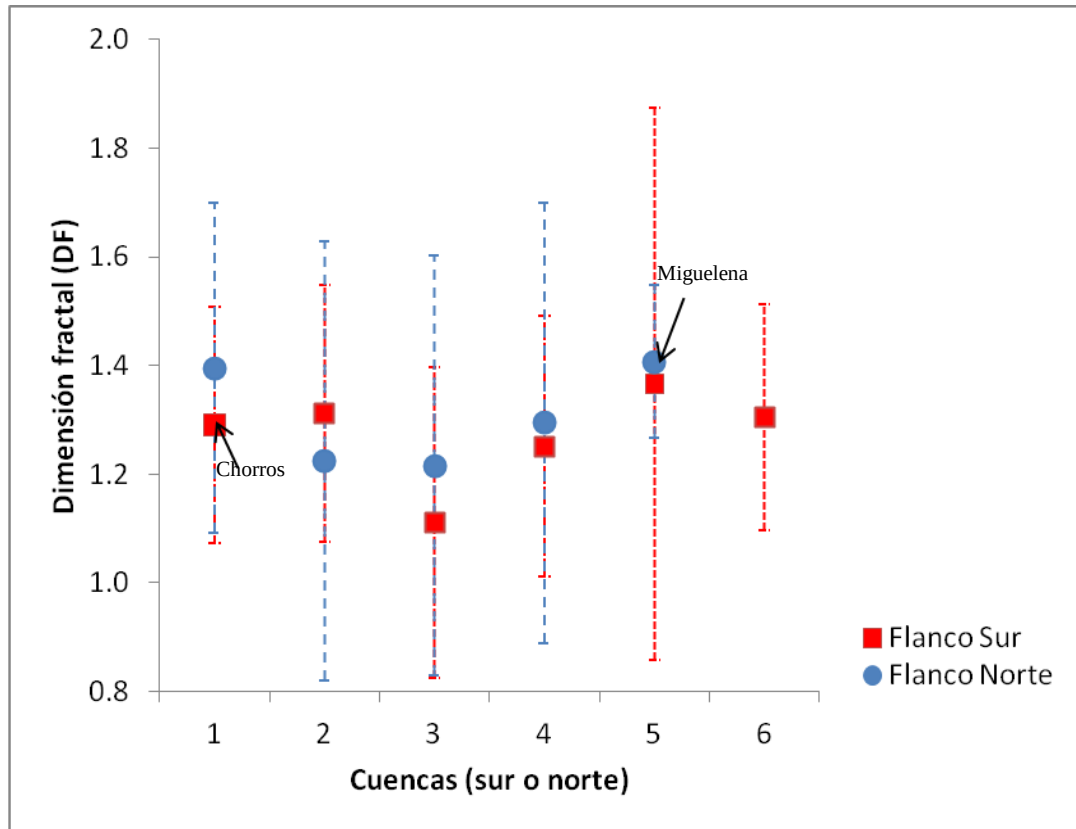


Figura 76. Comparación de valores calculados de la dimensión fractal para las cuencas situadas en ambos flancos

Tabla 22 . Correlaciones entre diversas variables geomorfológicas cuantitativas para el bloque tectónico Naiguatá

	<i>Pendiente (°)</i>	<i>Elevación (m)</i>	<i>HI</i>	<i>Rel 0.5</i>	<i>Rel 1k</i>	<i>Rel 3k</i>	<i>Rel 5k</i>	<i>Rel 7k</i>	<i>TSPP (Joules/Km²)</i>	<i>USPP (Joules/Km²)</i>	<i>SSPP (Joules/Km²)</i>	<i>IHP</i>	<i>CTSP</i>	<i>Prec (m)</i>	<i>SE</i>
Pendiente (°)	1														
Elevación	-0,24	1													
HI	-0,07	0,51	1												
Rel_0.5	0,97	-0,31	-0,19	1											
Rel_1k	0,80	-0,50	-0,39	0,91	1										
Rel_3k	0,21	-0,82	-0,57	0,36	0,66	1									
Rel_5k	0,26	-0,87	-0,52	0,36	0,56	0,89	1								
Rel_7k	0,24	-0,92	-0,60	0,34	0,56	0,91	0,99	1							
TSPP	0,70	-0,52	-0,22	0,77	0,84	0,62	0,54	0,54	1						
USPP	0,74	-0,62	-0,33	0,85	0,96	0,71	0,63	0,63	0,91	1					
SSPP	0,78	-0,63	-0,41	0,88	0,96	0,69	0,64	0,64	0,88	0,99	1				
IHP	0,45	-0,66	-0,55	0,58	0,68	0,54	0,58	0,61	0,53	0,73	0,79	1			
CTSP	0,70	-0,52	-0,22	0,77	0,84	0,62	0,54	0,54	1,00	0,91	0,88	0,53	1		
Prec.	0,48	-0,75	-0,60	0,63	0,86	0,86	0,75	0,77	0,81	0,92	0,91	0,78	0,81	1	
SE	-0,43	0,78	0,55	-0,55	-0,72	-0,73	-0,67	-0,71	-0,81	-0,83	-0,84	-0,80	-0,81	-0,90	1

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente investigación permite concluir lo siguiente:

1. A nivel mineralógico, entre las cuencas Miguelena y Chorros se encontraron minerales con una abundancia similar, como: Muscovita, Estauroлита, Óxidos, Topacio, , Andalucita, Ilmenita, Hornblenda, Cuarzo Turmalina, Monacita, Dolomita, y Piemonite, sin embargo, existe variación en algunos minerales, que sólo se encontraron en la Cuenca Miguelena, como lo son: Apatito, Augita y Limonita, y en la Cuenca Chorros; Hematita, Axinita, Circón, Enstatita, Lawsonita, Granate, Egirina, Glaucofano, Serpentina, Calcita, Anhidrita, Olivino, Zoisita, Clinozoisita, Barita. Minerales como el Hiperesteno y la Sillimanita se encontraron en ambas cuencas, pero a mayor cantidad en Miguelena y Rutilo en los Chorros. Cabe destacar que existen diferencias litológicas no tan amplias entre las cuencas Los Chorros y Miguelena y eso se reflejó en el análisis de minerales pesados.
2. Se pudo concluir que los sedimentos de las cuencas estudiadas provienen de 6 posibles fuentes, 3 principales: grupo 1 (ígneas ácidas), grupo 2 (pegmatitas graníticas), grupo 3 (ígneas ácidas) y grupo 4 (metamorfismo de contacto), grupo 5 (metamorfismo dinamo térmico), grupo 6 (gneises y esquistos). Cabe destacar que existen diferencias litológicas entre las cuencas Los Chorros y Miguelena y eso se refleja en el análisis de minerales pesados.
3. En cuanto al análisis de la forma de los granos, el estudio a través de la observación mediante una lupa, y luego en el laboratorio a través del programa de análisis de imágenes (Image J) resultaron altamente similares, lo

que permitió validar ambos métodos. También se pudo concluir que las muestras de ambas cuencas presentaron valores de redondez y esfericidad muy parecidos con un promedio entre 0,6 y 0,7, dichos granos están sub-redondeados, esto quiere decir que son resultado de muchos ciclos de transportes o de abrasión intensa.

4. La cuenca Chorros posee los mayores atributos primarios: elevación (media: 1892,91 m), pendiente (media: 26,77°). Sin embargo, la Cuenca Miguelena posee mayor tamaño: área (22894252,20 m²), perímetro (21347,48 m), longitud (7720,99 m), ancho (2965,20 m) y diámetro (5399,06 m), elongación (0,62), factor de forma (0,38), compacidad (1,26) y tasa de precipitación (1422,72 mm).
5. En cuanto a los atributos secundarios la cuenca Miguelena posee mayores valores de: Potencial total de flujo TSP (0,04±0,06 *Joules/Km²*), Poder unitario de la corriente USP (0,18±0,10 *Joules/Km²*), Poder de cizalla de la corriente SSP (0,33±0,13 *Joules/Km²*), Índices de Humedad IH (0,58±0,13), Capacidad de transporte de sedimentos CTS (0,04±0,06), sin embargo, la Cuenca Chorros posee un valor mayor de Integral hipsométrica HI (0,57).
6. De acuerdo con los índices de erosión, la mayor erosión fluvial está ocurriendo en la cuenca Miguelena, y esto se debe a que está recibiendo la mayor cantidad de precipitaciones, además de que sus características de pendiente facilitan los procesos de remoción en masas.
7. Entender la influencia de la tectónica sobre el área de estudio es una tarea complicada ya que la sismicidad registrada en el área es muy limitada para obtener las medidas sísmicas (energía y deformación) necesarias para su comparación con el relieve.

8. Los valores de integral hipsométrica permiten concluir que el paisaje de la cuenca de los Chorros y Miguelena poseen el mismo grado de madurez.
9. Los valores de dimensión fractal para ambas cuencas (Los Chorros: $1,2905 \pm 0,21637$) y (Miguelena: $1,4071 \pm 0,14084$) son muy similares al considerar el error, lo que indicaría que los procesos que controlan el paisaje actual podrían ser los mismos para ambas cuencas. Sin embargo, con la finalidad de discriminar esos procesos se ampliaron las cuencas de ambos flancos, y se calcularon los índices geomorfométricos.
10. Una vez que se amplió la cantidad de cuencas a cinco para el flanco norte y seis para el flanco sur, el análisis de correlación de Pearson y los análisis de regresión lineal permitieron discriminar como posible agente controlador del relieve del flanco norte la precipitación, esto explica la correlación existente entre los índices de erosión y el relieve para ese flanco. Con respecto al flanco sur, un posible agente controlador del relieve actual sería la sismicidad, pero a nivel local (escala 1km) se detectó una influencia del patrón de precipitaciones sobre el relieve actual.
11. A nivel global para las distintas cuencas ubicadas en el sector central del bloque Naguayá, el agente controlador del relieve actual resultó ser el patrón de precipitaciones.
12. La dimensión fractal DF entre las cuencas del flanco norte y sur son muy similares, análogamente los valores promedios de DF para las cuencas del flanco norte y las del sur están muy cercanos, lo que indicaría autosimilaridad en la red de drenajes de ambas cuencas, así el clima (precipitaciones) está afectando a toda el área de estudio.

13. Se recomienda utilizar otros métodos para la identificación de los minerales, entre ellos Difracción de Rayos X, Microscopía Electrónica, entre otros, esto para asegurar de manera objetiva y certera la correcta identificación de los mismos y realizar un estudio más completo.
14. Es recomendable datar mediante termocronología por trazas de fisión los minerales pesados separados para las distintas cuencas, eso daría una idea de las tasas de erosión a largo plazo y las diferencias en términos de edades de los posibles terrenos fuentes en caso de que las hubiera.
15. Se recomienda realizar un análisis granulométrico de sedimentos para todas las muestras, con el fin de complementar el estudio y tener una idea más certera, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas.
16. Los análisis de correlación realizados acá fueron hechos asumiendo una relación lineal entre los parámetros, aunque esto da una primera aproximación a la relación entre variables, no necesariamente esto debe satisfacerse, por lo tanto, es recomendable probar otros métodos de regresión no lineal.

REFERENCIAS

- Aguerrevere, S. & Zuloaga, G. (1937). Observaciones geológicas de la parte central de la Cordillera de la Costa, Venezuela. Bol. Geol. y Min., Caracas, 1(2 - 4): 8 - 24.
- Albornoz, M., & 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, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo.
- Álvarez, E. (2017). Comparación de Procesos Controladores 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, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo. 294 p.
- Angulo, L. & Jurado, M. (2004). Estudio petrográfico de las rocas del macizo Ávila recolectadas entre los ríos Miguelena y Camurí Chico y las quebradas Tacamahaca y Chacaíto, Edo Vargas-Miranda. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo. 230 p.
- Antezana, J. (2001). Calibración de los factores de erosión utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo revisado “RUSLE” en sistemas de producción agrícola de la cuenca Taquiña. Tesis Maestría Profesional en “Levantamiento de

Recursos Hídricos (Manejo y Conservación de Cuencas)”. Universidad Mayor de San Simón. Disponible: <http://www.umss.edu.bo/epubs/earts/downloads/66.pdf>

- Arcia, S. & Viana, C. (2014). 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, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo. 255 p.
- Baena, J. (1998). Reconocimiento geológico de la cuenca del río Tacamahaca, Parque Nacional El Ávila. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo.
- Barboza, L. & Rodríguez, S. (2001). Integración de la geología del estado Vargas y del flanco Sur del Macizo del Ávila al norte de Caracas. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo.
- Bastidas & Méndez (2007). Estudios de Porosidad de Núcleos usando Análisis de Imágenes “Visuales” en La Formación Misoa en Los Campos: Ceuta, Barúa y Motatán del Lago De Maracaibo. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo.
- Bermúdez, M.A., van der Beek, P.A., & Bernet, M., (2013). Strong tectonic and weak climatic control on exhumation rates in the Venezuelan Andes: Lithosphere, v. 5, p. 3-16.

- Bookhagen, B. (2010). High resolution spatiotemporal distribution of rainfall seasonality and extreme events based on a 12-year TRMM time series in review. (1998- 2009). <http://www.geog.ucsb.edu/~bodo/TRMM/>.
- Brunel, N. & Seguel, O. (2011). Efectos de la erosión en las propiedades del suelo. *Agro sur*, 2011, vol.39, no.1, p.1-12. *Agro Sur*, vol.39, no.1, p.1-12. Disponible en: <http://mingaonline.uach.cl/scielo.php>.
- Bustos, X., Bermúdez, M.A., Toro, G., Bernet, M., Rojas; O., Marín, M.I. (2013). Caracterización de superficies de erosión mediante geomorfología cuantitativa, Altiplano Antioqueño, Cordillera Central de Colombia. *Terra Nueva Etapa*, vol. XXIX, núm. 46, julio-diciembre, 2013, pp. 43-67
- Bustos, X. (2014). Estudio de la relación clima-tectónica-procesos superficiales del Altiplano Antioqueño, Colombia, mediante geomorfología, termocronología cuantitativa y geomática: Restricciones de la Geodinámica del Caribe sobre Los Andes Nortes de Suramérica. Tesis de Grado. Doctorado en Ciencias de la Computación, UCV.
- Bustos, X. (2013). Estudio de Procesos de Erosión Hídrica al Nor-Oeste de la Cuenca del Río Orinoco, empleando Geomorfología Cuantitativa, Geomática y Programación Orientada a Objetos. Trabajo de Ascenso. Caracas. Octubre 2015. Universidad Central de Venezuela
- Calderón, R. (2015). Estudio de los procesos erosivos en la zona circundante a los ríos Akanán y Aparamán mediante técnicas de geomorfología cuantitativa. Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado.
- Cano, V. & Melo, L. (2001). Reconocimiento geológico entre las cuencas de Quebrada Seca y Río Care, estado Vargas. *Geos*, UCV, Caracas, 35: 55-56, (+versión completa en CD). UCV-TEG.

- Capra, L., Lugo, J., y otros (2006). La importancia de la geología en el estudio de los procesos de remoción en masa: el caso de Totomoxtla, Sierra Norte de Puebla, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, número especial de geología urbana, tomo LVIII, núm. 2, 2006, p. 205-214. Disponible: [http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/5802/\(3\)Capra.pdf](http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/5802/(3)Capra.pdf)
- Carmona, S. & González, Z. (2014). Relación entre clima y tectónica sobre el relieve actual del flanco Surandino inferidos a partir del estudio de sedimentos modernos de las Cuencas hidrográficas de los ríos Canaguá, Caparo, Michay y Uribante. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, Inédito.
- Charlton, R. (2008). Fundamentals of fluvial geomorphology. Routledge Taylor & Francis Group, London and New York, 275 p.
- Dengo, G. (1950). Geología de la región de Caracas. Revista de Fomento, M.F., Caracas, 12(73): 213-298. Reimpreso en: "Geología de la región de Caracas". Bol. Geol., Caracas, 1(1): 39-115, 1951. Publicado en inglés: "Geology of the Caracas region, Venezuela. Geol. Soc. Amer. Bull., 64(1): 7-40, 1953.
- Derpsch, R., Roth, C.H., Sidiras, N., & Köpke, U., (1991). Controle da erosão no Paraná, Brasil: Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Sonderpublikation der GTZ, No. 245 Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Eschborn, TZ-Verlagsgesellschaft mbH, Rossdorf, 272 pp.
- Duque, E. (2003). Manual de geología para ingenieros. Universidad Nacional de Colombia, Manizales. (Rev. 2013).

- Elizalde, G. & Daza, M. (s/f). Evaluación de amenazas de movimientos en masa en paisajes montañosos: ejemplos en el Estado Vargas (Venezuela). Instituto de Edafología y Postgrado en Ciencia del Suelo, Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. Disponible en: http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/viewFile/1111/1039 *
- Escobar, J (2009). Descubre Vargas. Ediciones Grupo TEI. Editorial Cadena Capriles, 103 páginas.
- Felicísimo, A (1994). Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en ciencias ambientales. (<http://www.etsimo.uniovi.es/feli/pdf/libromdt.pdf>).
- Field, C., Barros V., y otros. (2012). Managing the risk of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Special report of the IPCC. Informe técnico, Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible en: https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX_Full_Report.pdf.
- Figueira, M. & Romero, L. (2014). Estudio comparativo de los índices de erosión mediante el análisis de minerales pesados, difracción de rayos x y microscopía electrónica de barrido en el área de los ríos San Carlos, Guache, Capitalejo y Guanare. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo.
- Finlayson, D. (2002). Large-scale Erosion Modeling in Geographic Information Systems. Tesis. Master of Science. Universidad de Washington. USA.
- Flores, J. & Méndez, A. (2005). Correlación Estratigráfica y Geocronológica de las quebradas Hoyos y Vichú por el método de Huellas de Fisión, Formación

Betijoque, Estado Trujillo- Trabajo Especial de Grado, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, UCV ,118 p.

- Flores, M. (2013). Estudio de la relación entre clima, erosión y tectónica a lo largo del Río Guárico mediante análisis geomorfológicos, geológicos y datos termocronológicos existentes. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo.
- Fournier, H; Lee, James; Urbani, F. (2011). Termocronología Ar-Ar de muestras del río Miguelena, estado Vargas y de rocas de afinidad greenviliana en el río Bocoy, estado Portuguesa, Venezuela. III Simposio Venezolano de Geociencias de Rocas Ígneas y Metamórficas. Revista Geos 41. <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:G0-sqR7zhJEJ:190.169.94.12/ojs/index.php>
- FUNVISIS. José Antonio Rodríguez Arteaga (2004). Breve historia de la sismología en Venezuela. Caracas 1070-A. http://www.funvisis.gob.ve/archivos/www/tecnica/docs/historia_sismologia.pdf
- García De Los Salmones, L., Urbani, F., Contreras, O. (1995). Geología de la cuenca del río Tócome, Parque Nacional El Ávila, Caracas, Venezuela. Bol. Geol., Caracas, Public. esp. 10: 279 - 286.
- Hackley, P.C., Urbani, F., Karlsen, A.W., Garrity, C.P. (2005). Geologic shaded relief map of Venezuela: USGS Open – file Report 2005 – 1038. <http://pubs.usgs.gov/of/2005/1038/>.
- Khanbabaie, Z, Karam, A., Rostamizad, G. (2013). Studying Relationships between the Fractal Dimension of the Drainage Basins and Some of Their

Geomorphological Characteristics. International Journal of Geosciences, 2013, 4, 636-642 <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2013.43058>.

- Lagos, E. (2006). Caracterización del proceso precipitación-escorrentía sólida utilizando un simulador de lluvia. 103 p. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales, Talca, Chile.
- López, N. & Uzcátegui, M. (2014). Estudio comparativo 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, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo.
- Loredó, C., Beltrán, S., & Moreno, S. (2007). Riesgo de erosión hídrica y proyección de acciones de manejo y conservación del suelo en 32 microcuencas de San Luis de Potosí”. Instituto nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. México.
- Mandelbrot, B. (1984). Fractals in physics: squig clusters, diffusions, fractal measures and the unicity of fractal dimensionality. J. Stat. Phys. 34, 895-930.
- Mange & Wright (2007). Heavy Minerals in Use Volume 58 de Developments in sedimentology. Elsevier Editor. 1283 p.
- Mantrilla, L., Casquet, C., Mas, J. (1998). Comparación entre el metamorfismo de la Cuenca de Cameros y el de la Cuenca Aurífera Witwatersrand (Sudáfrica). Implicaciones Metalogenéticas. Geogaceta, 24, 207-210.

- Martelo, M. (2003). La Precipitación en Venezuela y su relación con el Sistema Climático. Dirección de Hidrología y Oceanología-Dirección General de Cuencas Hidrográficas-MARN. Caracas, Venezuela.
- Martínez, M. & Materano, M. (2016). Estudio morfométrico de minerales pesados y caracterización geomorfológica cuantitativa de las cuencas de los ríos Bumbúm, Acequia, Socopó, Quiú y Santa Bárbara en el flanco surandino. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo.
- Moisy, F. (2008) Boxcount (MATLAB Central File Exchange).
- Montes, M., Domínguez, M. y Ventura, E. (s/f). Metodología para la estimación del riesgo de erosión hídrica en cuencas hidrográficas utilizando un SIG. Maestría en Hidráulica. Facultad de Ingeniería - División del Posgrado, Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México.
- Montgomery, D. & Brandon, M. (2002). Topographic controls on erosion rates in tectonically active mountain ranges: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 201, no. 3–4, p. 481–489
- Moore, I., Grayson, R. and Ladson, A.R. (1991). Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications. *Hydrological Processes*, 5, 3-30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- Navarro, E., Ostos, M., & Yoris, F. (1988). Revisión y redefinición de unidades litoestratigráficas y síntesis de un modelo tectónico para la evolución de la parte Norte - central de Venezuela durante el Jurásico Medio - Paleogeno. *Acta Científica Venezolana*, 39: 427 - 436.
- Pacheco, H. (2012). El índice de erosión potencial en la vertiente norte del Waraira Repano, estado Vargas, Venezuela. *Cuadernos de Geografía - Revista*

Colombiana de Geografía. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia
Disponible: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/view/32215/36772>.

- PDVSA – LÉXICO ESTRATIGRÁFICO. (2011). *Formación Metaígneas de Tócome*. Tomado de: <http://www.pdv.com/lexico/t370w.htm>
- PDVSA – LÉXICO ESTRATIGRÁFICO. (2011). *Formación Metagranito de Naiguatá*. Tomado de: <http://www.pdv.com/lexico/n001w.htm>
- PDVSA – LÉXICO ESTRATIGRÁFICO. (2011). *Formación Esquisto de San Julián*. Tomado de: <http://www.pdv.com/lexico/s210w.htm>
- PDVSA – LÉXICO ESTRATIGRÁFICO. (2011). *Formación Augengneis de Peña de Mora*. Tomado de: <http://www.pdv.com/lexico/p410w.htm>
- PDVSA – LÉXICO ESTRATIGRÁFICO. (2011). *Formación Fase (Complejo La Costa) Tacagua*. Tomado de <http://www.pdv.com/lexico/t401w.htm>
- PDVSA – LÉXICO ESTRATIGRÁFICO. (2011). *Formación Fase Antímano*. Tomado de: <http://www.pdv.com/lexico/a330w.htm>
- Ramírez, J. (2002). Extracción automática de redes de drenaje a partir de modelos digitales de terreno. Tesis de grado. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia.
- Ramírez, F. (2006). Evaluación del riesgo por erosión potencial de la zona cafetera central del Departamento de Caldas. Tesis de grado. Facultad de Ingeniería Forestal. Universidad del Tolima. Colombia.

- Ribeiro, JR., P. & Diggle, P. (2006). Model-based Geostatistic. Springer Series in Statistics. Hardcover. New York.
- Rodríguez, J; Urbani, F; Audemard, F; Stockhausen,H; Barboza, L; Rodríguez,S ; Melo, L; Cano, V; Suárez,J ; Castillo, Fournier,H.(2001). El Macizo del Ávila, geología y procesos de agradación ocurridos en diciembre, 1999. Taller Internacional “Estudios de métodos y acciones para contrarrestar los efectos producidos por terremotos en Caracas (1999 – 2001). Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, FUNVISIS. Caracas.13 p.
- Rodriguez-Iturbe, I., Rinaldo, A., Rigon, R., Bras, R.L., Ijjasz-Vasquez, E., Marani, A. (1992). Fractal structures as least energy patterns: The case of river networks. Geophysical Research Letters 19: doi: 10.1029/92GL00938. issn: 0094-8276.
- Rue, H., Martino, S., Chopin, N. (2009). Approximate Bayesian Inference for Latent Gaussian Models Using Integrated Nested Laplace Approximations. Series B, 71, Part 4, pp. 319-392.
- Sabino, I. & Urbani, F. (1995). Geología del flanco Sur del pico Naiguatá, Parque nacional El Ávila, estado Miranda, Venezuela. Bol. Geol., Caracas, Public. esp. 10: 287 - 296.
- Sánchez Martín, J. M. & Gurría Gascón, J. L. (1999). “Aplicación SIG para la localización óptima de inversiones: los alojamientos rurales en Extremadura”. Congreso sobre la Evaluación de Nuevas Tecnologías de Exploración del Territorio a Través de Cartografía y SIG. Centro Universitario de Mérida. UEX.de Cartografía y SIG. Centro Universitario de Mérida. UEX.

- Sarabia, J. & Pascual, M. (2007). Curso Básico de Estadística para Economía y Administración de empresas. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria.
- Sharma, S.K., Tignath, S., Gajbhiye, S., & Patil, R. (2013). Use of Geographical Information System in Hypsometric Analysis of Kanhiya Nala Watershed. International Journal of Remote Sensing & Geoscience (IJRSG). Vol 2, 3. ISSN No: 2319-3484
- Shreve, R. (1966). Statistical law of stream numbers. J. Geol. 74. 17-37.
- Shih, H., Yang, Ch., & Velleux, M. (2006). Surface Erosion Equation Approach Using Energy Principles. The 7th Int. Conf. on Hydrosience and Engineering (ICHE-2006), Sep 10 –Sep 13, Philadelphia, USA.
- Strahler, A.N. (1952). Hypsometric area-altitude analysis of erosional topography. Bulletin of the Geological Society of America v. 63 p. 1117-1142.
- Talukdar, S. & Loureiro, D. 1981. Geología de una zona ubicada en el segmento norcentral de la Cordillera de la Costa, Venezuela: metamorfismo y deformación. Evolución del margen septentrional de Suramérica en el marco de la tectónica de placas. Geos, UCV, Caracas, 27: 15-76.
- Tokunaga E. (1966). The composition of drainage network in Toyohira River Basin and the valuation of Horton's first law. Geophys. Bull. Hokkaido Univ. 15:1–19.
- Tokunaga E. (1978). Consideration on the composition of drainage networks and their evolution. Geogr. Rep. Tokyo Metrop. Univ. 13:1–27
Tokunaga E. (1984). Ordering of divide segments and law of divide segment numbers. Trans. Jpn. Geomorphol. Union 5(2):71–77.

- Tokunaga, E. (1984). Ordering of divide segments and law of divide segment numbers. *Trans. Jpn. Geomorphol. Union* 5(2):71–77.
- Turcotte, D.L. (1997). *Fractal and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, 398 p.
- Urbani, F. & Ostos, M. (1989). El Complejo Ávila, Cordillera de La Costa, Venezuela. *Geos, UCV, Caracas*, (29): 205 - 217.
- Urbani, F. (2002). El río Miguelena de Camuri Grande, estado Vargas: Una ventana a la geología de la Cordillera de la Costa. *Guía de excursión*. 62 p.
- Urbani, F. (2009). La Cordillera de la Costa de Venezuela: Evolución de su conocimiento geológico desde el siglo XVI al XXI. Conferencia Academia Nacional de Ingeniería y Hábitat 12 de mayo de 2009. Caracas (sitio web: http://www.acading.org.ve/info/comunicacion/criterioopinion/sillon_XXVI/2009-05-12-Conferencia_ANIH_Cordillera.pdf)
- Uzcategui, R. (1997). Reconocimiento geológico del flanco sur de la Silla de Caracas, Miranda y Distrito Federal. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo.
- Whipple, K. & Tucker, G. (2002). Implications of sediment-flux-dependent river incision models for landscape evolution, *J. Geophys. Res.*, 107(B2), 10.1029/2000JB000044.
- Willet, S. (2002). Orogeny and orography: The effects of erosion on the structure of mountain belts. *Journal of Geophysical Research* 104, 28, 957-28.

- Wilson, J. & Gallant, J. (2000). *Terrain Analysis: Principles and Applications*: New York, John Wiley & Sons, Inc., 479 p.

- Wischmeier, W. & Smith, D (1978). *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. United States Department of Agriculture. Washington, D.C.

- Zhang, Y., Hernández, E. (2012). Modeling climate change effects on runoff and soil erosion in southeastern Arizona rangelands and implications for mitigation with conservation practices. *Journal of Soil and Water Conservation* 67 (5): 390-405. Disponible en: www.swcs.org

