

MARNR-DGIIA
Dirección de Hidrología
División de Hidrometeorología
Dpto. de Investigaciones Hidroclimáticas

FUNDAMENTOS DE GEOMORFOLOGIA DINAMICA
CON ENFASIS EN LOS PROCESOS FLUVIALES

David Pérez Hernández

1977

I N D I C E

	Pág.
1. INTRODUCCION	1
2. LOS SISTEMAS NATURALES E IDEALIZADOS	2
3. LA GEOMORFOLOGIA FLUVIAL Y LA INGENIERIA HIDRAULICA E HIDROLOGICA	4
4. DEFINICION DEL SISTEMA DE DRENAJE	4
5. LA CUENCA HIDROLOGICA. DESCRIPCION	6
5.1 Hipsometría	6
5.2 Ley de las Pendientes de los Canales	8
5.3 Relaciones pendientes de los canales-pendientes de las vertientes de valles	10
5.4 Perfil longitudinal y concavidad del perfil	11
5.5 Pendiente media de la cuenca	15
5.6 Patrones de drenaje	17
6. LAS REDES DE DRENAJE, DEFINICION, CLASIFICACION Y NOMENCLATURA	20
7. TEORIA DE PROBABILIDADES Y DESARROLLO DE LA RED	23
8. RELACIONES ANALITICAS ENTRE LOS ELEMENTOS DE LA CUENCA HIDROLOGICA	26
8.1 Relación entre las longitudes del canal principal y las áreas de drenaje	26
8.2 Constante de mantenimiento de los canales	29
8.3 Radio de elongación	32
8.4 Radio de bifurcación	32
9. EVOLUCION Y ESTRUCTURAS DE LAS REDES DE DRENAJE	33
9.1 Ley de las áreas de drenaje	33
9.2 Ley de las longitudes de los canales	36
9.3 Ley del número de canales	37
9.4 Densidad de drenaje	38
9.5 Configuración de los canales naturales	40
9.6 Barras arenosas	42
9.7 Planicies fluviales	44

10. INFLUENCIA Y SIGNIFICANCIA DE LAS VARIABLES GEOMORFICAS	47
Procesos	47
Estructurales	50
Estados de desarrollo	51
10.1 Carácter de las variables dentro de las escalas de tiempo	54
10.2 Variables hidráulicas - geométricas en los canales	61
11. CONCLUSIONES	65
12. DEFINICION DE TERMINOS	67
13. BIBLIOGRAFIA	70

1. INTRODUCCION

En los últimos años Ingenieros Hidrólogos, Hidráulicos y Geólogos trabajando en el campo y los laboratorios, así como otros estudiosos de las ciencias de la tierra, han reconocido la importancia de concebir en forma interrelacionada los procesos y mecanismos que definen y controlan los sistemas naturales; esto ha dado un gran impulso y ha permitido reorientar la investigación en estos campos y mejorar las prácticas de diseño así como facilitar la adopción de soluciones a problemas no bien documentados dentro de una especialidad específica. Actualmente, uno y otro profesional, reconocen la real importancia de la compenetración y el intercambio de información en beneficio del avance en el conocimiento de la naturaleza y la solución de problemas complejos de hidrología e hidráulica.

La Geomorfología, rama de la geología que se ocupa del estudio, descripción y análisis de los procesos y formas resultantes del relieve, es un importante eslabon necesario para lograr este propósito.

Aun cuando no se pretende aquí cubrir todos los aspectos involucrados en esta especialidad y reconociendo que son numerosos e inter-relacionados, se pretende entre los objetivos de este informe, hacer una descripción analítica y cuantitativa de aquellos más relevantes, haciendo énfasis en los de carácter fluvial, resaltando los de mayor interes práctico e ingenieril. A menudo, se hacen consideraciones especiales referentes al comportamiento de cuencas y la mecánica fluvial de ríos de Venezuela así como de las formas resultantes del paisaje.

2. LOS SISTEMAS NATURALES E IDEALIZADOS

Con el propósito de compenetrarnos con el ámbito y el medio físico objeto del estudio geomórfico, es necesario hacer una diferenciación entre los sistemas idealizados y los naturales. Los primeros representan simplísticos esquemas mentales que hacen abstracción de algunos procesos ó simplifican su interrelación para obtener una respuesta ó comportamiento del mismo. Ellos cuando son manipulados eficientemente (simulación, modelaje etc) pueden llevar a un mejor conocimiento de aspectos de la naturaleza, lográndose identificar y calificar los parámetros físicos relevantes que controlan los procesos dentro del sistema. En estos sistemas, las relaciones causas-efectos pueden ser suficientemente definidas para un propósito práctico. En el caso de los sistemas naturales, la situación es realmente distinta: La cantidad de variables que intervienen son numerosas, las interrelaciones entre ellas son complejas e indefinidas operando simultáneamente ó no y las respuestas del sistema pueden ser diversas, dependiendo de como operen los procesos de control.

El ciclo hidrológico en una cuenca por ejemplo, puede considerarse idealizado, si reconocemos que la precipitación ó la nieve (entrada) activan la generación de esorrentía (salida) a través de un sistema de transporte (atmósfera, canales, lagos, embalses, suelo superficial y subsuperficial) cuya configuración física y estructural, se interpreta como no relacionada con la fuente generadora. Obviamente, cuando se consideran procesos adicionales directa ó indirectamente relacionados al ciclo hidrológico como son la erosión y el transporte de sólidos, lo cual lleva, en conjunción a la acción de agentes endógenos, a la

evolución del relieve y las formas geomórficas, se llega a un sistema realmente complejo: el natural. El tiene como propiedad relevante, la imposibilidad de ser reproducido artificialmente en toda su extensión. Muchas características del sistema natural, pueden ser sin embargo, analizadas y estudiadas. La estructura física del sistema es una de las más importantes. En el caso de los fluviales -nuestro objetivo-, esto es factible mientras que a través de la observación confirmamos que muchos de ellos han evolucionado, en ambientes geológicos y climáticos similares, con tipos análogos de procesos operando a través del tiempo, resultando formas con similitud geométrica, y en casos disimiles, cuando uno ó varios de estos factores han cambiado. Esto les hace propicios para ser analizados usando criterios estadísticos y ser sometidos a la comparación, y en muchos casos, a la generalización.

Existen sin embargo, dos importantes restricciones que hacen limitante nuestra capacidad de observación. Los procesos endógenos no pueden ser investigados en toda su extensión, excepto en áreas localizadas muy superficiales de la corteza terrestre. En segundo lugar, las magnitudes del tiempo involucradas en los procesos evolutivos, corresponden a diferentes escalas geo-cronológicas no factibles de seguir en forma directa en todas sus extensiones. De tal forma que, al hablar de la evolución de un sistema fluvial, es más propio referirse a su "herencia" más que a su nacimiento, tal como lo han reconocido Leopold, Wolman y Miller en un texto clásico (3) * de esta especialidad.

* () Significa Bibliografía

3. LA GEOMORFOLOGIA FLUVIAL Y LA INGENIERIA HIDRAULICA E HIDROLOGICA

El agua es sin duda el agente dinámico externo más activo como determinante de las formas geomórficas. Durante el desarrollo de estas formas (valles fluviales, canales, lagos y otros cuerpos de agua) están involucrados tanto procesos hidrológicos, geológicos, como hidráulicos. En muchos casos el interés geológico puede perseguir la localización de yacimientos minerales ó aguas en el subsuelo. Las ciencias hidrológicas requieren un mejor conocimiento del ciclo hidrológico y para ello, se hace necesario una comprensión más clara del sistema físico. Las obras hidráulicas al ser proyectadas requieren de análisis relativos a su influencia e impacto sobre la dinámica y el equilibrio ambiental y muchas veces para su diseño, se hace indispensable conocer, la forma como se comportan sistemas análogos en la naturaleza. En ambos casos, la geomorfología fluvial puede ser una herramienta auxiliar útil e indispensable. No sería cuestionable entonces establecer, que el avance futuro de estas ramas de la ingeniería se haga complementario y beneficioso en el sentido de llevar a alcanzar importantes objetivos sociales, prácticos y científicos en pro del desarrollo.

4. DEFINICION DEL SISTEMA DE DRENAJE

Los sistemas de drenaje se definen como sistemas físicos abiertos, debido a que a través de sus bordes ó contornos, coincidentes con la superficie terrestre o lechos de embalses y canales en los de tipo fluvial, se produce una transferencia de escurrimiento y transporte de sólidos (partículas discretas y solubles), al ser excitados por la precipitación. Estos como la mayoría de los sistemas físicos

son no estacionarios en el sentido de que, los parámetros físicos y las variables que definen sus comportamientos dinámicos, experimentan variaciones dependientes del tiempo.

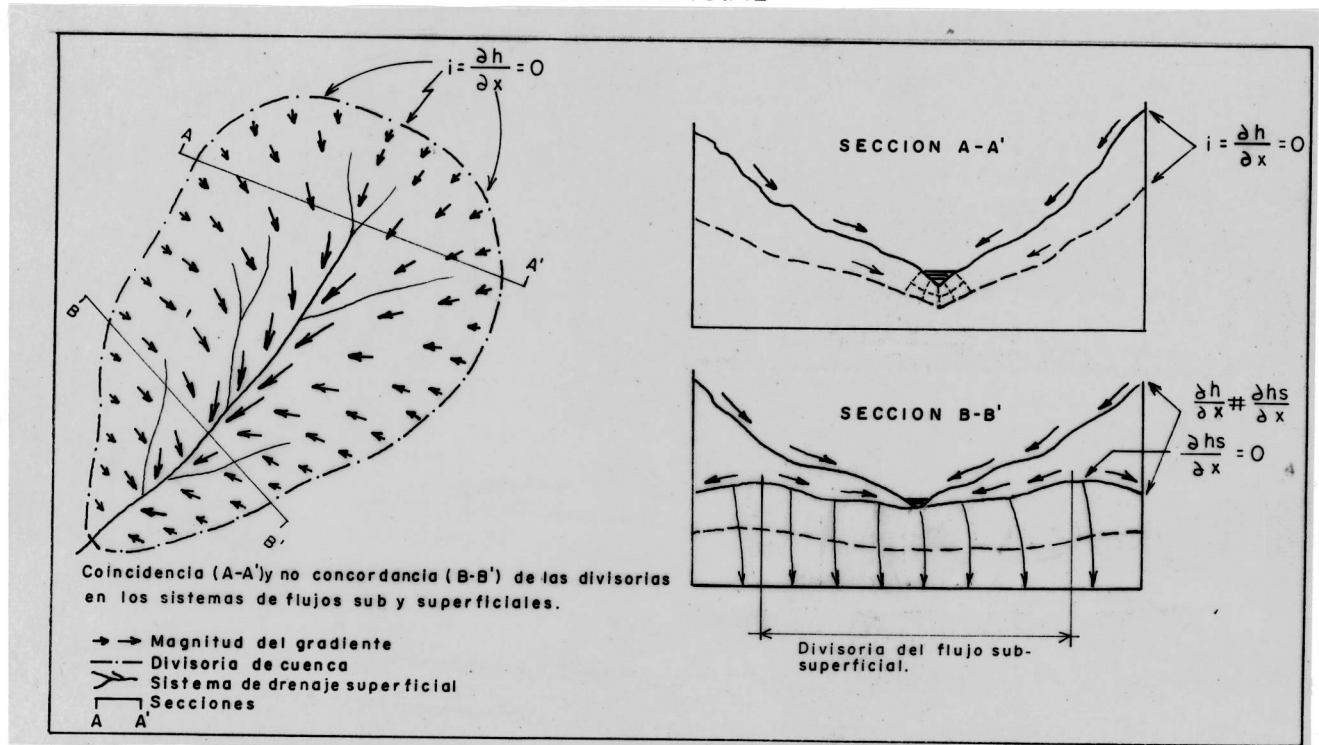
El desarrollo de canales y microrredes de escorrentía, resulta de la concentración del flujo y su acción dinámica en tramos superficiales del contorno.

Sus orientaciones estan definidas por el gradiente del potencial en cada punto, de forma que los contornos del sistema estan, no solamente definidos por las características físicas sino también por el estado del flujo dentro del sistema. Así que rigurosamente, podemos determinar el borde de un sistema de drenaje, si se elige una sección en uno de los canales y trazamos aguas arriba, a cada instante, las líneas de corriente con igual potencial hasta determinar aquellos puntos en los cuales la energía del gradiente se hace cero. La unión de ellos producen una curva cerrada (incluido el punto a la salida), no necesariamente conectada, pero conexa tal que, el escurrimiento superficial generado por la lluvia, se exporta del área encerrada por ella, a través del punto considerado. Para muchos fines hidrológicos e hidrográficos, esta curva se considera coincidente con la divisoria ó parte-aguas. Cuando se consideran sistemas de flujos sub-superficiales, puede que se tengan local ó internamente a esta curva, uno ó varios puntos con gradientes hidráulicos nulos, los cuales también pueden ser externos a la divisoria como ocurre con los sistemas regionales de flujos subterráneos que pueden tener dimensiones a escalas mayores a la de la cuenca hidrológica (Gráfico N° 1). Esto hace que ambas divisorias no concuerden necesariamente en proyección horizontal y en una cuenca como la que ilustra el gráfico y podrían

ser ó no, de una sección a otra, diferentes respecto al sistema fluvial general.

GRAFICO N° 1

PERFIL DE LA CUENCA Y DIVISION DEL DRENAJE SUPERFICIAL Y SUBSUPERFICIAL



El propósito nuestro es entonces, considerar aspectos atinentes a los sistemas fluviales superficiales sin dejar de reconocer su interrelación íntima con los subsuperficiales.

5. LA CUENCA HIDROLOGICA - DESCRIPCION

5.1 Hipsometría

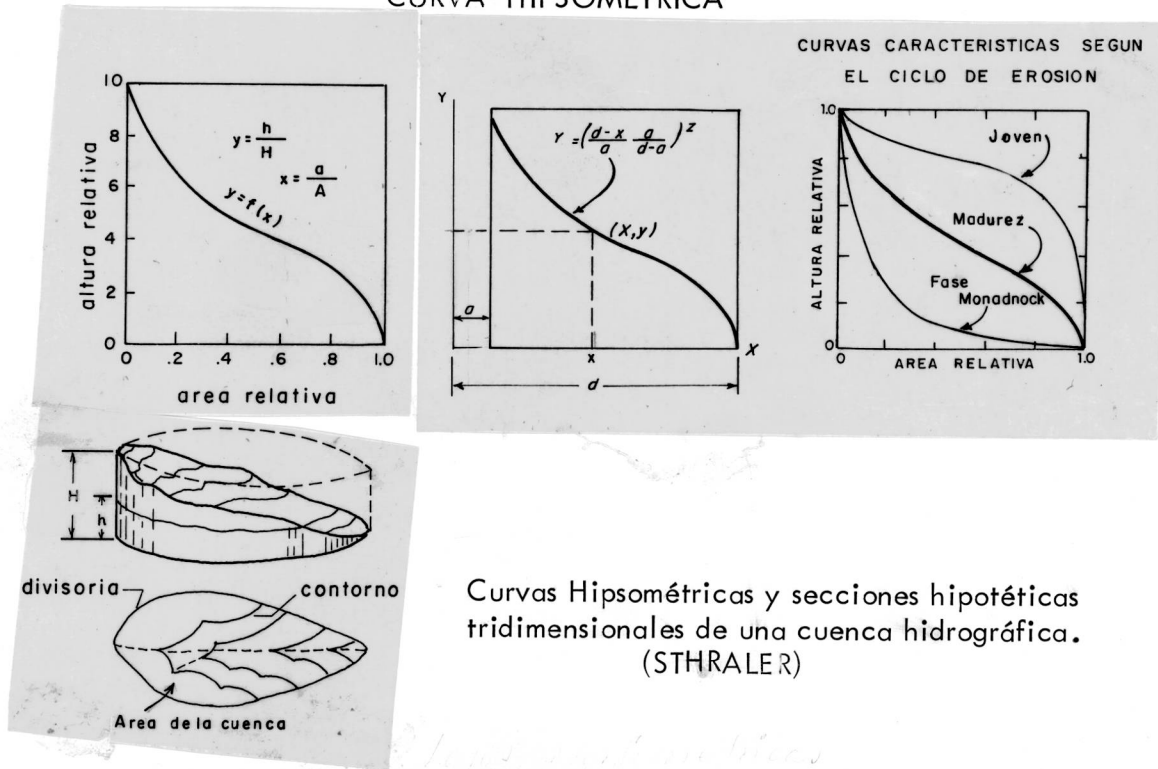
Muchos ingenieros estan familiarizados con el uso de mapas y relaciones bidimensionales del tipo elevaciones respecto a la longitud

de un canal, los cuales permiten determinar tanto las formas de las cuencas en proyección horizontal, como la pendiente media y radios de relieve.

Los accidentes ó irregularidades del paisaje es lo que se ha denominado "el relieve", un término cualitativo que puede ser poco descriptivo si solo él es usado, para definir las formas espaciales de la superficie del terreno. Un concepto objetivo que da una idea más clara de la configuración tridimensional de una cuenca, es el de la curva hipsométrica, Gráfico Nº 2, la cual relaciona las alturas relativas, respecto a las áreas relativas determinadas por la intercepción de planos horizontales, a diferentes elevaciones con la superficie del relieve. Según la configuración resultante de ellas, puede inferirse cual es el estado de desarrollo del relieve; además, como éstas reflejan la acción de factores tanto exógenos como endógenos, ellas son guías útiles para interpretar diferentes evoluciones de las formas geomórficas, así como para diagnosticar, la influencia de variables hidrológicas, que cambian con la elevación de la cuenca.

GRAFICO N° 2

CURVA HIPSOMETRICA



5.2 Ley de las Pendientes de los Canales

Es un hecho, que las pendientes de los canales situados a mayor elevación sobre una cuenca, son siempre mayores a las de aquellos situados en los tramos inferiores. La razón de ello es algo que no ha sido aun explicado satisfactoriamente por geomorfólogos.

La magnitud del gradiente topográfico, cualquiera que sea el canal considerado, es una función tanto de variables hidráulicas como de la consistencia litológico-estructural de las formaciones disectadas y de la forma como se produce y distribuye la energía a través del canal. En las zonas de relieve elevado los procesos orogénicos y climáticos han afectado

normalmente con mayor intensidad las rocas, causando un debilitamiento estructural y en su composición (meteorización), lo cual determina tendencias a ser afectadas tanto por la concentración del escurrimiento superficial como subsuperficial. Ello causa mayores ratas de suministro en condiciones de equilibrio incipientes dentro de los bordes del sistema. Así, mientras las probabilidades de que las componentes de la fuerza gravitacional que actúan sobre los materiales, sean siempre superiores a las fuerzas resistentes (cohesión, compacidad, tensiones capilares, etc), los estados de equilibrio más probables en los bordes del sistema ocurrirán en los niveles más bajos.

El proceso de transferencia del flujo en un tramo fluvial, puede considerarse como de tipo irreversible, siendo la energía potencial transformada, conforme se concentra el escurrimiento superficial, en energía cinética, disipándose una fracción por fricción con los contornos (lechos y planicies fluviales), otra es usada para remover y transportar sólidos (solubles y suspendidos). De aquí que se hace necesario, considerar la forma como se distribuye y disipa la energía en el sistema, mientras que cada uno de estos procesos energéticos condicionan la geometría y forma de contorno donde ellos se producen. Este razonamiento, llevó a Leopold y Lanbeing (1962) a proponer la hipótesis de que el trabajo unitario realizado por el flujo* - γQS - es constante, siendo la sumatoria de sus pro

* Dimensionalmente: $\frac{(\text{Fuerza}) (\text{Longitud})}{(\text{Tiempo}) (\text{Longitud})} = \frac{(\text{Fuerza})}{(\text{Longitud})^3} \times \frac{(\text{Longitud})^3}{(\text{Tiempo})} \times \text{Gradiente}$

$$\frac{(\text{MLT}^{-2}) (\text{L})}{(\text{T}) (\text{L})} = \frac{(\text{MLT}^{-2})}{(\text{L})^3} \times \frac{(\text{L})^3}{(\text{T})} \times \left(\frac{\text{L}}{\text{L}}\right) = \text{MLT}^{-3}$$

ductos, al considerar todas las longitudes incrementales del tramo, un valor mínimo y esto se verifica solamente, cuando el perfil longitudinal es cóncavo, condición geométrica que implica la ocurrencia de mayores pendientes en los tributarios situados a mayores elevaciones, respecto a los ubicados en los tramos inferiores de las cuencas. Así, el perfil longitudinal deducido solo de consideraciones de la distribución de la energía, representa el estado para el cual existe la más probable distribución, tanto de las variables geométricas como hidráulicas.

Empíricamente Horton ha sugerido que:

$$\frac{\bar{S}_u + r}{\bar{S}_u} = R_s^r \dots\dots\dots (1)$$

que es conocida, cuando se aplica a valores promedios como ley de las pendientes de los canales, habiéndose determinado de mediciones tanto en cuencas geológicamente jóvenes como maduras, que $R_s = 0.55$.

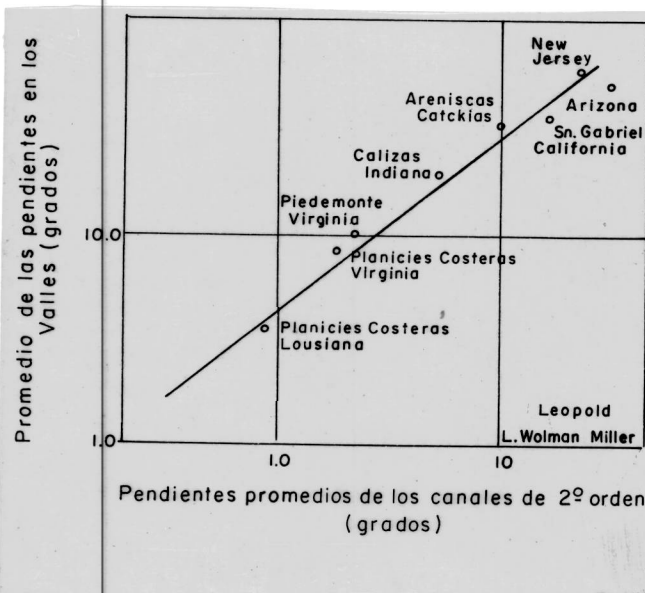
5.3 Relaciones Pendientes de los Canales - Pendientes de las Vertientes de Valles

Strahler (9) como Schumm (11) han definido relaciones entre las pendientes de vertientes de valles y las pendientes del canal confinado, el primero usó datos de cuencas de diferentes regiones de USA bajo diferentes condiciones geológicas y climáticas, mientras Schumm ha empleado datos de valles aluviales usando como parámetro de relación la sinuosidad - P - de los canales, lo cual a su vez guarda relación con la frac

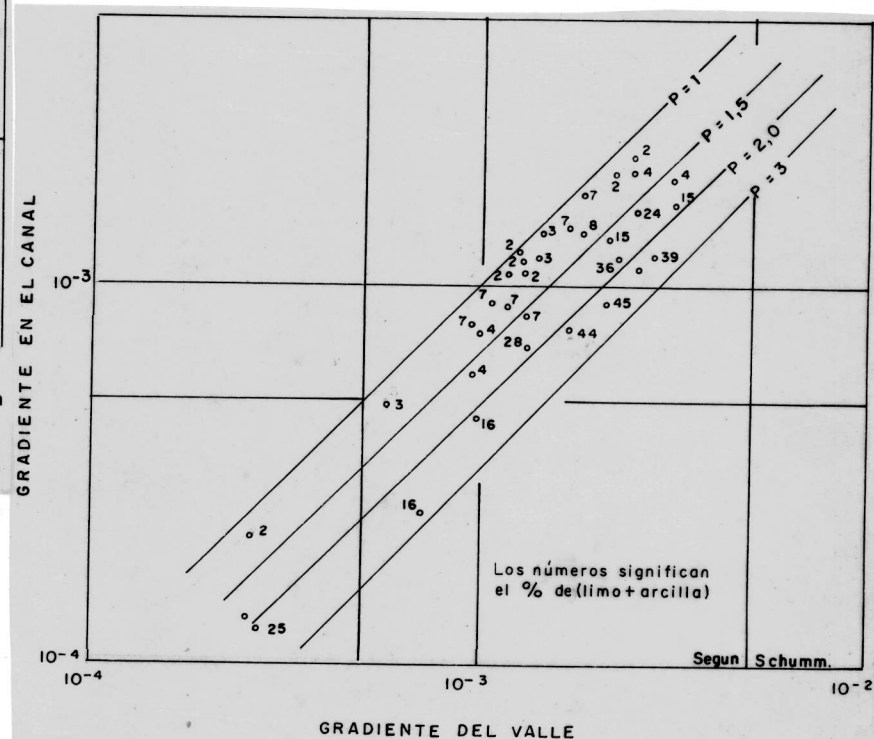
ción fina (limo + arcilla), que forman los depósitos aluviales. Los Gráficos N° 3 y 4 muestran claras tendencias lineales entre estas variables.

GRAFICOS N°s 3 y 4

N° 3 Relación entre las pendientes de los valles y los canales.



N° 4 Relación entre las pendientes de los canales y pendientes de valles aluviales. El parámetro de relación es la sinuosidad - P -



5.4 Perfil Longitudinal y Concavidad del Perfil

La representación de las elevaciones en un canal natural respecto a la distancia desde su nivel de base, produce una curva como la ilustrada en la figura A , esta sigue una tendencia exponencial de la forma:

$$X = L (y)^H \dots\dots\dots (2)$$

que puede tambien expresarse como:

$$H \propto \text{Log}_y \left(\frac{X}{L} \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{siendo: } y = \frac{L}{1 + L} \dots\dots\dots (4)$$

La concavidad se define como la relación de la distancia vertical entre el arco y la cuerda del perfil, respecto a la elevación de la cuerda en el punto correspondiente a la longitud media del cauce.

FIGURA -A-

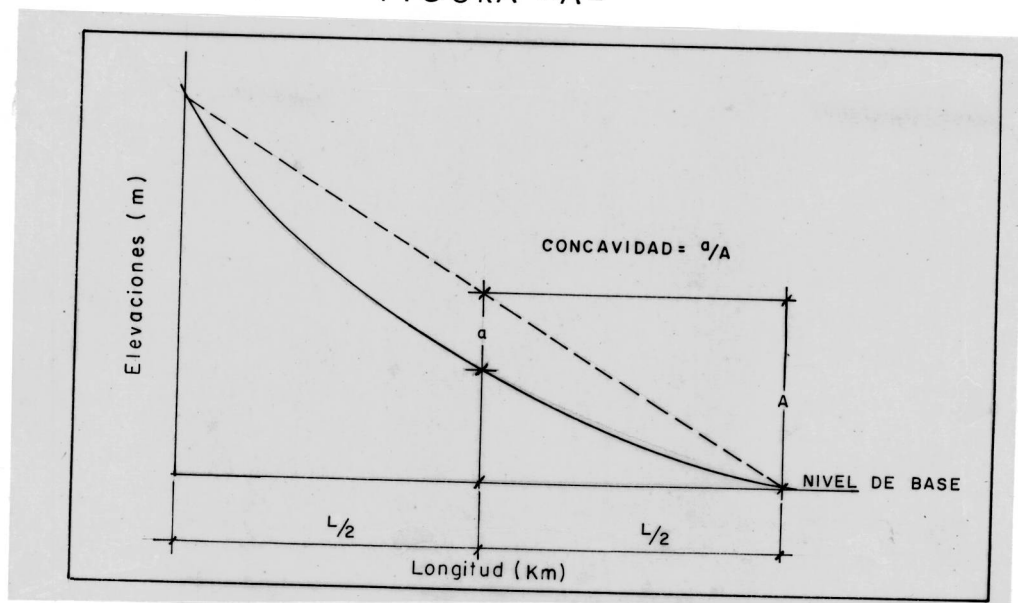


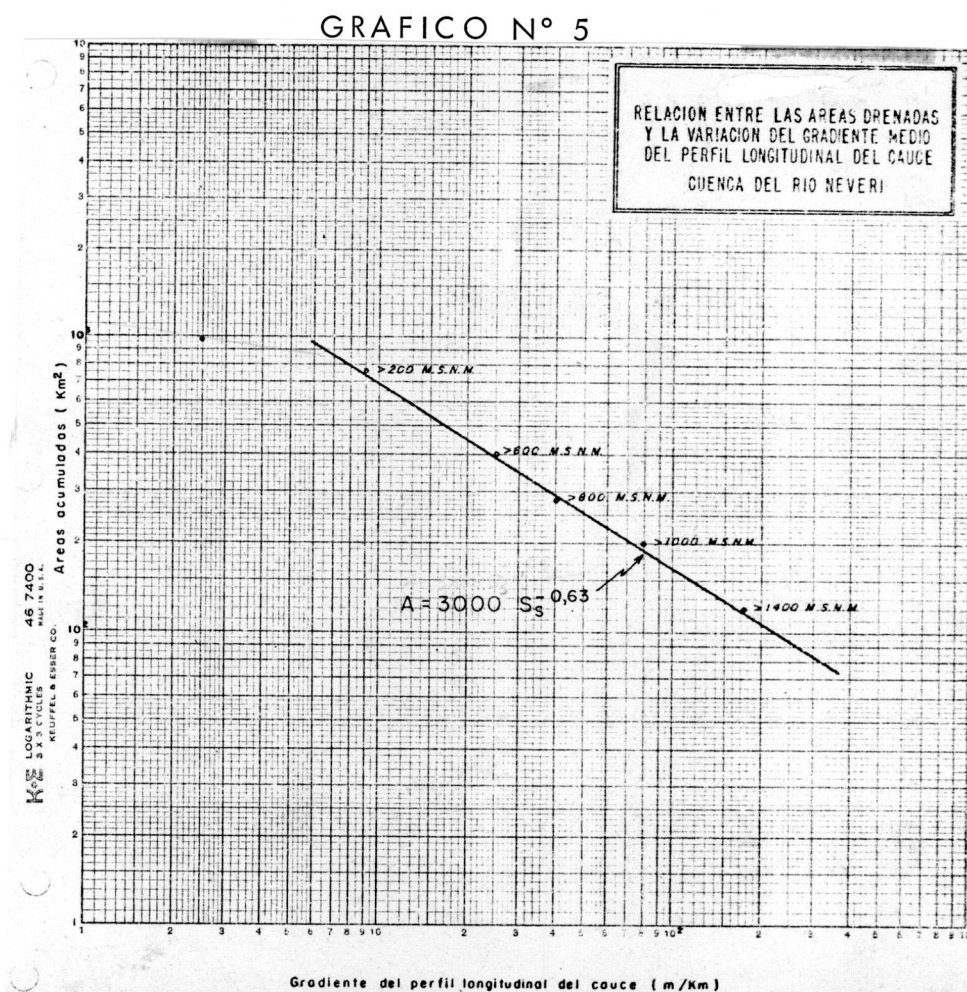
Figura -A-. Perfil longitudinal y la concavidad en un canal

Ambos parámetros fisiográficos tienen importancia debido a que ellos han probado guardar correlación con diversas variables hidrológicas, así co-

mo con aquellas que determinan el suministro y transporte sólido en los sistemas fluviales. Como resultado de la ley de las pendientes de los canales y el comportamiento del perfil longitudinal en los diferentes tramos, se han establecido relaciones logarítmicas lineales, entre las áreas acumuladas en la dirección en que se produce el aumento del relieve, respecto al gradiente topográfico medio de los tramos del canal, éstas han mostrado seguir expresiones del tipo:

$$A = K S^{-\epsilon} \dots\dots\dots (5)$$

la relación encontrada para la cuenca de Neverí en el Oriente de Venezuela, se ilustra en el Gráfico N° 5.



deduciéndose que los gradientes locales máximos, pueden alcanzar hasta valores de 200 m/km ó más; igualmente es notoria, la brusca transición del perfil longitudinal al desarrollarse el canal, en los sectores de las planicies costeras al Mar Caribe.

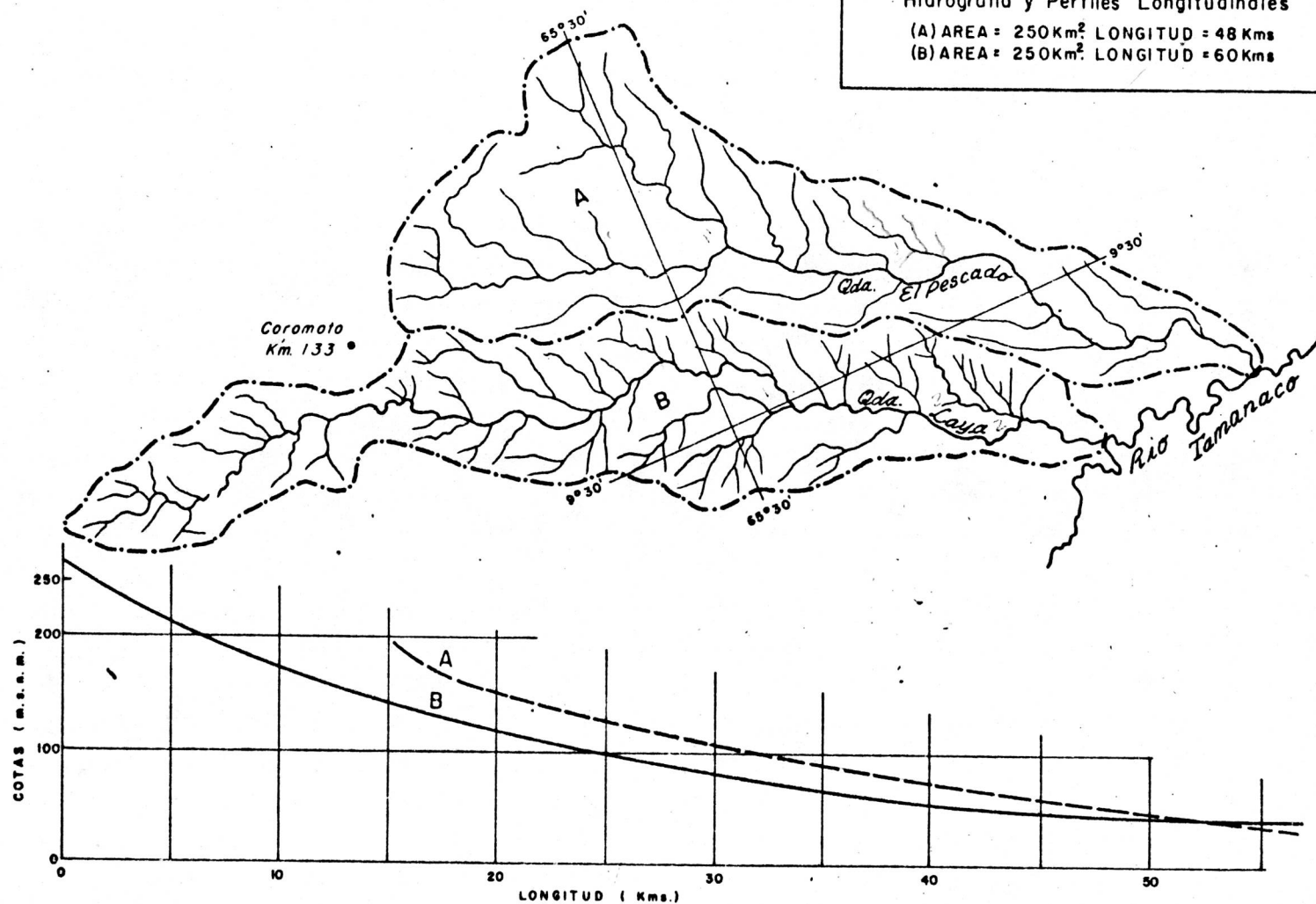
Comparar la evolución y configuración de los perfiles longitudinales entre cuencas, drenando áreas geológicamente homogéneas y de clima similar, no deja de ser interesante. El Gráfico N° 6 muestra el mapa hidrográfico y la tendencia de dos perfiles, en subcuencas adyacentes que son drenadas por contribuyentes al río Tamanaco, un tributario del Unare (Mapa 1), en áreas onduladas de los llanos centrales del país, donde la litología de arcillas y limolitas de la formación Chaguaramas, es común a ambas. Los cauces de los ríos Laya y el Pescado se han desarrollado evidenciando una influencia marcada de la pendiente suave regional SE, desarrollando un patrón sub-paralelo de drenaje y exhibiendo ambas, analogías morfológicas y diferenciaciones obvias en las configuraciones fluviales. Consideraciones similares a las hechas al analizar el perfil longitudinal se han establecido, para relacionar la concavidad con diversas variables hidráulicas y geométricas en los canales. Las experiencias de mediciones en muchas cuencas, muestran que ella es una función inversa del recíproco del radio del relieve, cuanto mayor sea el relieve para una longitud dada de la cuenca, menos cóncavo es el perfil. Esto guarda concordancia con el comportamiento de modelos deducidos por procesos aleatorios (Random Walk) fundamentados en la distribución de la energía

GRAFICO Nº 6

Subcuencas Laya y el Pescado.
Hidrografía y Perfiles Longitudinales

(A) AREA = 250Km² LONGITUD = 48 Kms

(B) AREA = 250Km² LONGITUD = 60 Kms



en el sistema; pero en adición a ello, se hace necesario dar explicaciones físicas más convincentes que permitan clarificar de que forma y bajo diferentes condiciones geomórficas e hidráulicas, es que se produce el ajuste entre todas las variables que condicionan el comportamiento de los sistemas fluviales.

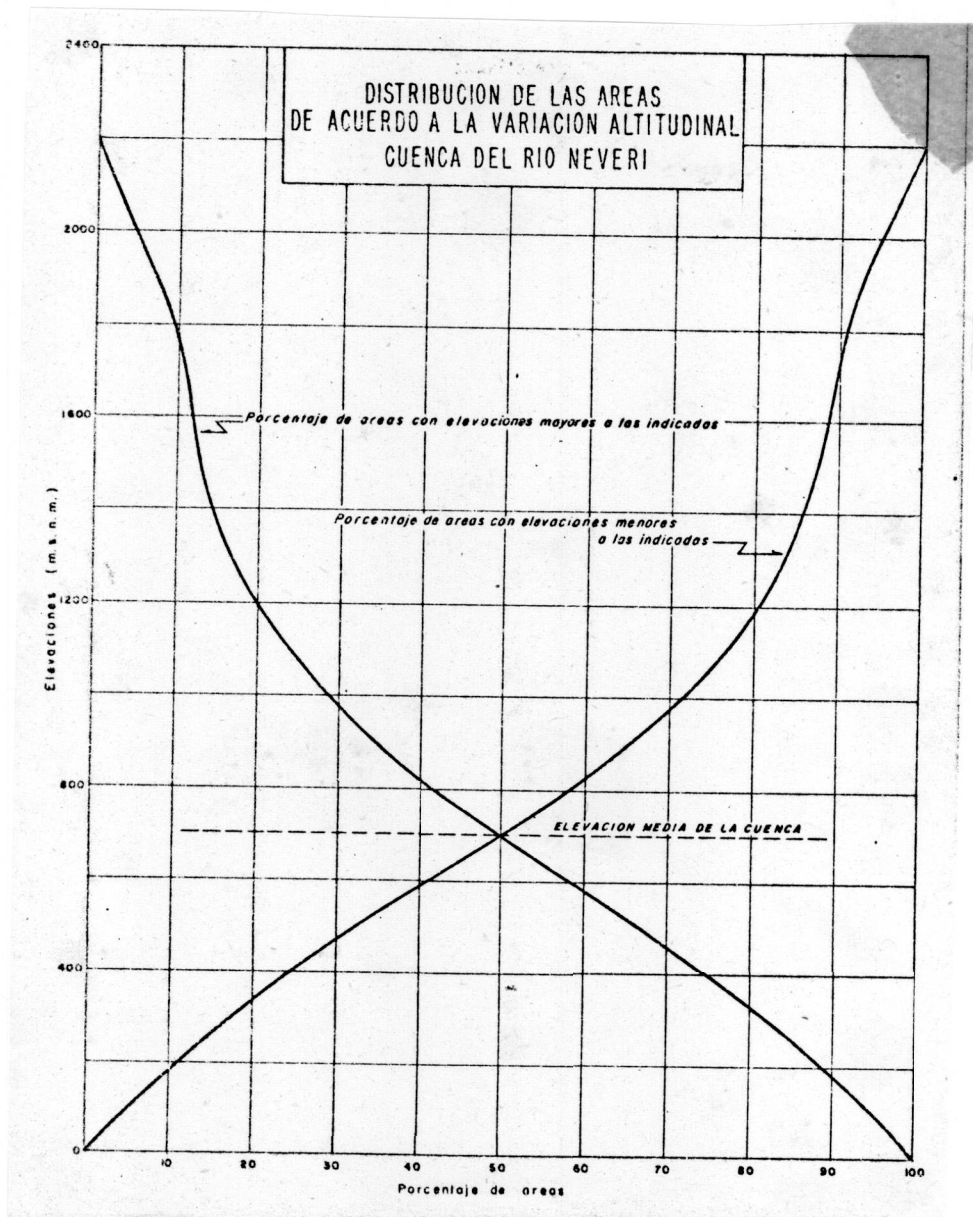
5.5 Pendiente Media de la Cuenca

Una gráfica que ilustre la variación de las áreas porcentuales de la cuenca, respecto a las elevaciones de diferentes planos horizontales provee un medio adecuado, para establecer la pendiente media del relieve de una cuenca. Mediciones realizadas en diferentes cuencas indican que el gasto pico de crecientes generadas por lluvias con una frecuencia dada, está relacionado con las formas de estas curvas, lo cual les asigna un gran interés hidrometeorológico, particularmente en la implementación de modelos a ser aplicados en áreas con déficit de información. Estas relaciones además, permiten inferir como es el relieve a diferentes elevaciones, lo cual puede servir para analizar factores geológicos asociados a la erosión y el suministro sólido, también como guías para decidir alternativas ó prioridades de uso y manejo de las tierras y finalmente como patrones de comparación en las formas geomorfológicas de cuencas de una a otras regiones.

El Gráfico N° 7 muestra la curva obtenida para la cuenca del río Neverí, donde puede observarse que un relativamente bajo porcentaje

de las áreas (15%) exhibe un relieve que puede catalogarse como muy pronunciado a elevaciones que superan los 1400 m.s.n.m. La elevación media de la cuenca está 125 m más baja que la altura media de las tierras continentales.

GRAFICO N° 7

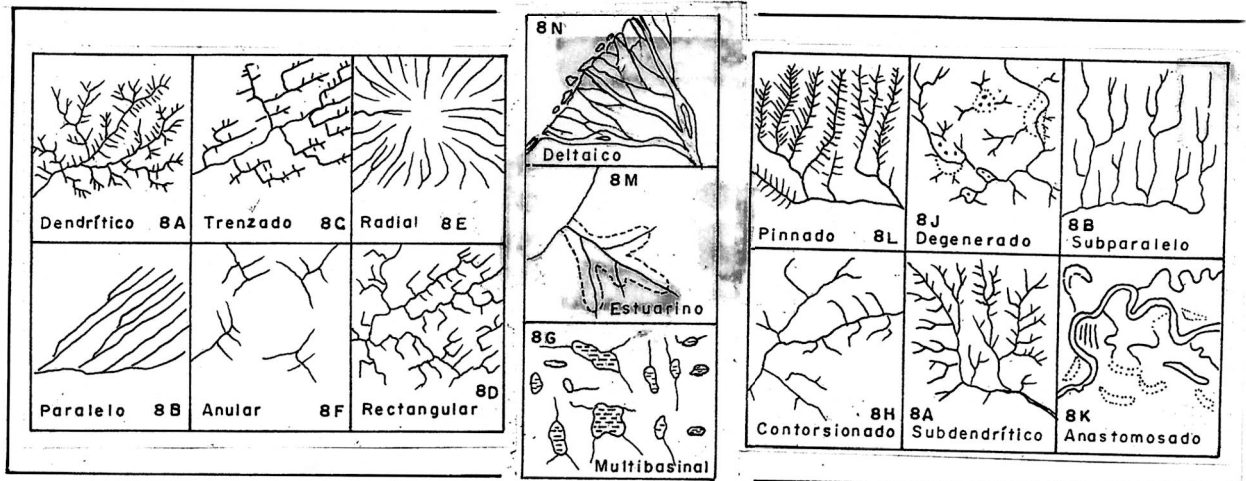


5.6 Patrones de Drenaje

La acción combinada de agentes internos (geológicos) y exógenos (clima), producen las diferentes morfologías del relieve, lo cual a su vez determina las formas particulares que exhiben las redes o sistemas de canales que forman la hidrografía de una cuenca o región. Eventualmente, el hombre puede modificar artificialmente estos sistemas mediante la construcción de obras de drenaje, derivaciones, embalses, trasbases etc.

Diferentes patrones de drenaje han sido descritos en geomorfología y cada uno de ellos se ha asociado a procesos particulares y características, propios del medio en los cuales ocurren. El Gráfico N° 8 es una expresión de cada una de estos patrones cuya denominación obedece a su configuración geométrica y espacial.

GRAFICO N° 8



Configuración morfológica de diferentes patrones fluviales de drenaje.

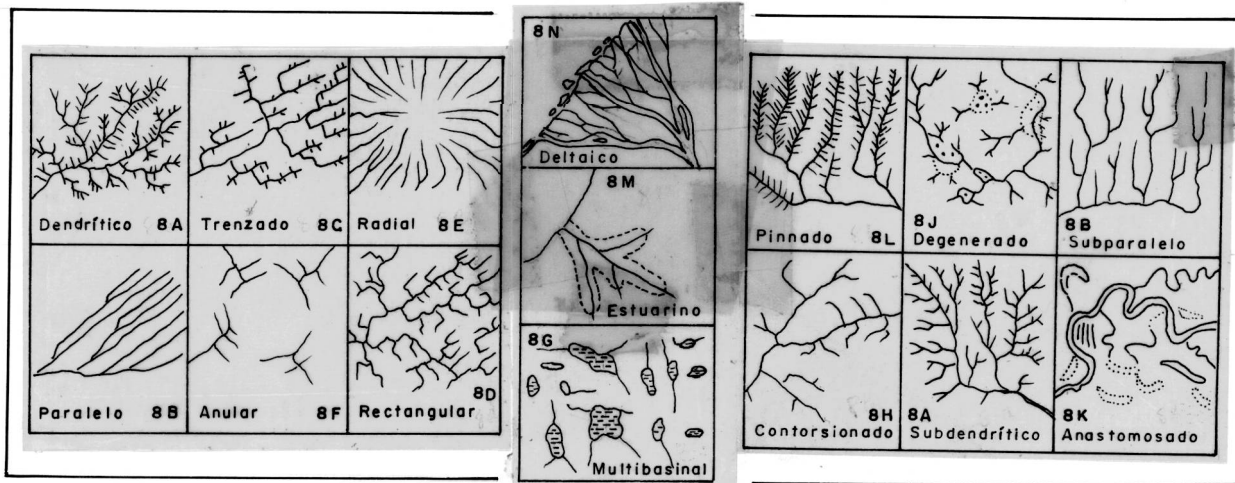
El dendrítico (8A) y subdendrítico, se ha asociado a regiones con una li

5.6 Patrones de Drenaje

La acción combinada de agentes internos (geológicos) y exógenos (clima), producen las diferentes morfologías del relieve, lo cual a su vez determina las formas particulares que exhiben las redes o sistemas de canales que forman la hidrografía de una cuenca o región. Eventualmente, el hombre puede modificar artificialmente estos sistemas mediante la construcción de obras de drenaje, derivaciones, embalses, trasbases etc.

Diferentes patrones de drenaje han sido descritos en geomorfología y cada uno de ellos se ha asociado a procesos particulares y característicos, propios del medio en los cuales ocurren. El Gráfico N° 8 es una expresión de cada una de estos patrones cuya denominación obedece a su configuración geométrica y espacial.

GRAFICO N° 8



Configuración morfológica de diferentes patrones fluviales de drenaje.

El dendrítico (8A) y subdendrítico, se ha asociado a regiones con una l

logía homogénea propensa a la erosión y con pendientes superficiales graduales de carácter regional.

El paralelo y subparalelo (8 B) ocurre en terrenos con declives pronunciados y litología homogénea normalmente al pie de montañas en emergencia (llanos occidentales).

El trenzado (Trellis) (8C) se produce en regiones con rocas poco resistentes alternando con otras resistentes a la erosión, plegadas y distorcionadas por el tectonismo, conservándose las divisorias con escaso drenaje y erosión, debido a su mayor resistencia (galeras del Guárico, frente de montañas de la Cordillera de la Costa).

El tipo rectangular (8D) se produce en zonas que han sido afectados por el fracturamiento y fallamiento en bloques donde las orientaciones de los planos de falla se interceptan normalmente.

El patrón radial (8E) es típico el estructuras dómicas y volcánicas donde el drenaje diverge desde la zona topográficamente más elevada . Cuando la alternancia de rocas resistentes y erosionables se produce en estructuras de este tipo, originándose denudación diferencial más alta en las últimas, entonces se origina un patrón de tipo anular (8F). El tipo multibasinal (8G) de drenaje, ocurre en regiones, en las cuales el drenaje original fué perturbado por glaciación, volcanismo reciente, disolución Karstica, ó permafrost - (suelos congelados).

El tipo contorsionado (8H) es natural de regiones que han sido dislocadas y afectadas por el tectonismo acompañado de ciclos magmáticos

con intrusión y metamorfismo activo. El tipo indefinido (8j) se produce en zonas y márgenes a los canales principales con áreas depresivas, representando estados avanzados del tipo de patrón anastomosado (8k), que es común en planicies fluviales de poca pendiente, donde los canales se separan y convergen en forma interdigitada (confluencia Guere-Unare). El tipo pinnado (8L) ocurre en áreas con litología muy erosionable pudiendo ser un estado transicional del tipo dendrítico y a menudo, observados conjuntamente. Dos patrones adicionales que ocurren en las zonas de transición entre los ríos y zonas de descarga (lagos, embalses, mar), son los de tipo estuarino (8m) y deltaico (8 n) y se han incluido aquí aun que ellos dependen además, de la acción de otros factores en conjunción al efecto de los cauces de esorrentía.

Estas normas que establecen la asociación de un tipo de patrón a un ambiente específico, son muy generales y no deben tomarse como únicas y rigurosas. Algunos autores han asociado estas morfologías a otros hechos naturales sin suficiente argumentación, cuando ciertamente ellas pueden ocurrir en un mismo ambiente geológico bajo diferentes escalas geométricas, representar estados transicionales de otros esquemas o combinarse para reproducir morfologías diferentes a los patrones normales. Una alta disponibilidad y/u ocurrencia de aguas subterráneas se ha asociado por ejemplo, a un patrón de drenaje dendrítico, cuando realmente, otros factores geológicos (pedogenéticos-litológicos ó estructurales), pueden ser más relevantes como factores generadores de dichas formas.

Las estructuras compuestas dentro de zonas ó regiones que abarcan extensiones de carácter local y/o regional, son también detectables en diferentes regiones y dentro de las cuales se admite la similitud de algunas de las condiciones climático-geológicas, bajo las cuales ellas se reproducen. En zonas erosionales que forman auténticos "bad Lands" de la formación mesa de los llanos de Venezuela, ocurre con frecuencia el sistema dendrítico-pinnado a diferentes escalas de desarrollo, contrastando ampliamente con zonas llanas levemente onduladas del paisaje adyacente, donde no se observa apreciable desarrollo de las redes de escorrentía. Lo que se ha confirmado del estudio y análisis de gran cantidad de patrones en diversas regiones del mundo, es que solo un limitado número de parámetros independientes son relevantes para determinar un tipo específico de configuración y además que, los actuales observados en las cuencas hidrográficas, no son más que variaciones aleatorias de la tendencia media.

6. LAS REDES DE DRENAJE, DEFINICION, CLASIFICACION Y NOMENCLATURA.

Una preocupación de geomorfólogos ha sido la de establecer una jerarquización y adecuada clasificación de los sistemas de drenaje y sus componentes básicos. Esto ha permitido hacer comparaciones y analizarlos en una forma más objetiva.

Una definición conceptual para la red de drenaje implica considerarla como un sistema formado por un número de elementos de magnitud finita (en

modelos cartográficos a escala), lo cual a la vez que permite diferenciar su configuración, les hace propicios para ser analizados mediante el análisis combinatorio y topológico*.

Si se considera una estructura simple de la red de drenaje, en la cual la interconexión de tramos lineales formarían los canales naturales, los siguientes elementos pueden diferenciarse (Fig. A).

FIGURA -A-

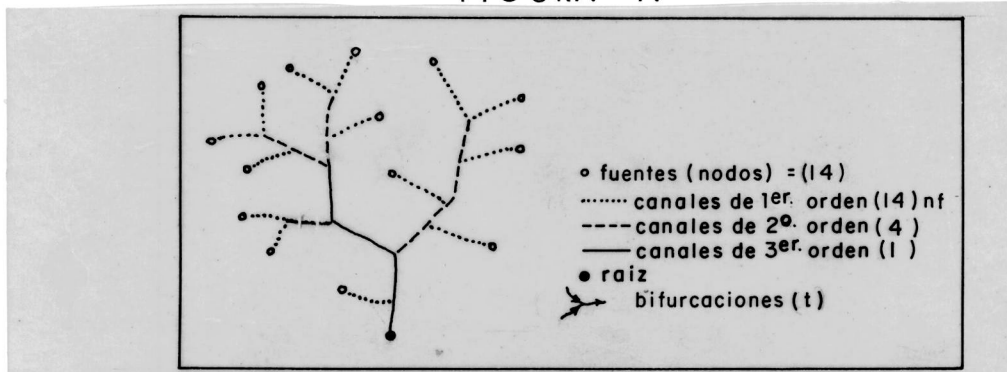


Figura -A- una red de drenaje finita con sus elementos principales.

- Los nodos fuentes, son puntos de origen de los canales, cuya unión determina divisorias entre subcuencas ó contornos de la cuenca (teóricamente existe un número infinito de fuentes).
- Nodos internos no interconectados entre sí, donde al menos tres canales - dos contribuyentes - y uno de advección convergen.
- La raíz es el punto (nodo) del canal, topográficamente más bajo de la red y el único al cual converge uno y solo un contribuyente.
- La unión de nodos de tal forma que no se produzcan curvas cerradas dentro de la red (Isletas y barras fluviales harían más compleja esta definición).

* la Topología.-Rama de la matemática moderna que se ocupa del estudio general de las vecindades o de las propiedades geométricas que subsisten en un medio después de una deformación continua.

La identificación y jerarquización de los elementos de la red, depende de la escala cartográfica elegida y su grado de detalle. Así cualquier análisis de los elementos de la red, hace necesario se especifique la escala de mapas. El ordenamiento de los tramos, implica adoptar un criterio selectivo, que es útil y está fundamentado en el análisis combinatorio. Asumiéndose que el escurrimiento superficial se produce desde las fuentes hacia la raíz, se denominan canales de "primer orden", aquellos que se pueden desprender de la red y los cuales contienen nodos fuentes. En este proceso se tiene la reducción de un nodo fuente y una bifurcación; si se repite una remoción de los canales a los cuales contribuyan los anteriores, se tienen los canales de "2º orden", y así sucesivamente para obtener canales de órdenes más elevados. El número de veces que se requiere repetir el proceso, hasta remover el último canal de la red, determina el orden último de ese canal, que también lleva al concepto de "orden de la cuenca". Mientras que la adición de un canal durante el proceso de desarrollo de una red finita, produce la introducción de dos nodos y una bifurcación excepto en el último, entre estos elementos se verifican las siguientes relaciones:

$$n = 2 n_f - 1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{n + 1}{t + 1} = 2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$t + 1 = n_f \quad \dots\dots\dots (7a)$$

Dos ó más canales contribuyendo a un mismo nodo, se considera pro
ducen bifurcaciones independientes. Vista en esta perspectiva la red de dre
naje, es factible entonces desarrollar relaciones analíticas que ayuden a
comprender mejor el comportamiento y evolución de las redes de drena
je.

7. TEORIA DE PROBABILIDADES Y DESARROLLO DE LA RED

Si se concibe a los nodos, bifurcaciones y tramos ó canales de órdenes
dados, como elementos finitos de la red, es factible definir distintas interrelacio
nes topológicas entre ellos, en términos del uso de modelos teóricos. Se puede
establecer así, el número posible de patrones de un orden dado, que resultarían de
combinar patrones de órdenes distintos y formados por un número diferente de ca
nales. Shreve (8) indica que el número de posibles patrones - $N(nf)$ - con - nf -
canales de primer orden formados por combinación de - $n(i)$ - patrones con - i -
canales y los $N(nf-i)$ patrones con - $(nf-i)$ - canales, es según la fórmula recursi-
va:

$$N(nf) = \sum_{i=1}^{n-1} N(i) N(nf-i) \dots\dots\dots (8)$$

$$nf = 2, 3, 4, \dots\dots n$$

que es similar a la expresión usada en análisis combinatorio:

$$N(nf) = \frac{1}{n} \binom{n}{nf} = \frac{1}{2nf-1} \frac{n!}{nf! (n-nf)!} \dots\dots\dots (9)$$

siendo: $n! = n (n-1) (n-2) (n-3) \dots (1) \dots (10)$

$$n = 2nf - 1 \dots (11)$$

Mientras que el número de patrones topológicamente distintos de orden α -
conteniendo nf canales, se obtiene de la sumatoria de todos aquellos patrones ge-
nerados por la combinación de dos que tienen el orden $(\alpha-1)$, con aquellos produ-
cidos combinando uno de orden α con los de órdenes más bajos, ó sea:

$$N(nf, \alpha) = \sum_{i=1}^{n-1} \left[N(i; \alpha-1) N(n-i; \alpha-1) + 2 N(i; \alpha) \sum_{\alpha=1}^{\alpha-1} N(nf-i; \alpha) \right] \dots (12)$$

$$N(1, 1) = 1 ; N(1; \alpha) = N(nf, 1) = 0 \dots (13)$$

Así que, la probabilidad de obtener una población de patrones con un número
especificado de canales, para un orden dado de la cuenca es:

$$P(n, \alpha) = \frac{N(n, \alpha)}{N(n)} \dots (14)$$

La probabilidad de seleccionar al azar un canal de primer orden, desde una pobla-
ción de patrones de órdenes α es:

$$P(1; \alpha) = \frac{nf}{2nf-1} \dots (14-a)$$

y la de seleccionar un canal de orden β - distinto a este orden (interior a la red)

supuesto el mismo orden de los patrones es:

$$P(\beta, \alpha) = 1 - P(i, \alpha) = 1 - \frac{nf}{2nf-1} = (nf-1)/(2nf-1) \dots\dots\dots (14-b)$$

y la probabilidad de seleccionar un canal de orden β al azar, de una población de patrones aleatorios de órdenes α es:

$$P(\beta; \alpha) = \frac{(\alpha - \beta + 1) N(\alpha - \beta + 1) N(\beta)}{(2\alpha - 1) N(\alpha)} \dots\dots\dots (15)$$

TABLA N° 1

DISTRIBUCION PROBABILISTICA DE PATRONES TOPOLOGICAMENTE DIFERENTES
CON ORDENES HASTA 7. SEGUN SHREVE. 1966-

		$P(nf, \alpha)$					
nf	$N(nf)$	$\alpha = 2$	$\alpha = 3$	$\alpha = 4$	$\alpha = 5$	$\alpha = 6$	$\alpha = 7$
6	42	0.381					
16	9.695×10^6	0.169×10^{-2}	0.753	0.245	0.103×10^{-5}		
25	1.290×10^{12}	0.650×10^{-5}	0.357	0.642	0.772×10^{-3}		
27	1.837×10^{13}	0.183×10^{-3}	0.292	0.706	0.177×10^{-2}		
50	5.096×10^{26}	0.552×10^{-12}	0.194×10^{-1}	0.874	0.106	0.243×10^{-7}	
64	9.430×10^{34}	0.489×10^{-16}	0.307×10^{-2}	0.743	0.254	0.382×10^{-5}	0.106×10^{-3}
75	3.115×10^{41}	0.303×10^{-19}	0.683×10^{-3}	0.617	0.382	0.437×10^{-4}	0.347×10^{-2}
100	2.275×10^{56}	0.139×10^{-26}	0.201×10^{-4}	0.361	0.638	0.122×10^{-2}	0.115×10^{-1}
200	1.29×10^{116}						
500	1.35×10^{296}						
1000	5.12×10^{596}						

La Tabla N° 1 ha sido calculada por Shreve usando este razonamiento y ella muestra por ejemplo, que un sistema formado por 16 canales puede llevar a producir 9695 millones de patrones diferentes, siendo mayor la probabilidad de ocurrencia para una cuenca de 3^{er} orden respecto a los de cualquier otro

y esta probabilidad de ocurrencia se reduce en más de la mitad, cuando se incrementa hasta 25 el número de canales, conservándose siempre el mismo orden. En conjunción a estos conceptos es necesario sin embargo, analizar aspectos físicos del ambiente para explicar como ocurren en la naturaleza las tendencias más probables en la configuración de los patrones de la red, visto que en ello influyen procesos de muy diversa índole.

8. RELACIONES ANALITICAS ENTRE LOS ELEMENTOS DE LA CUENCA HIDROLOGICA

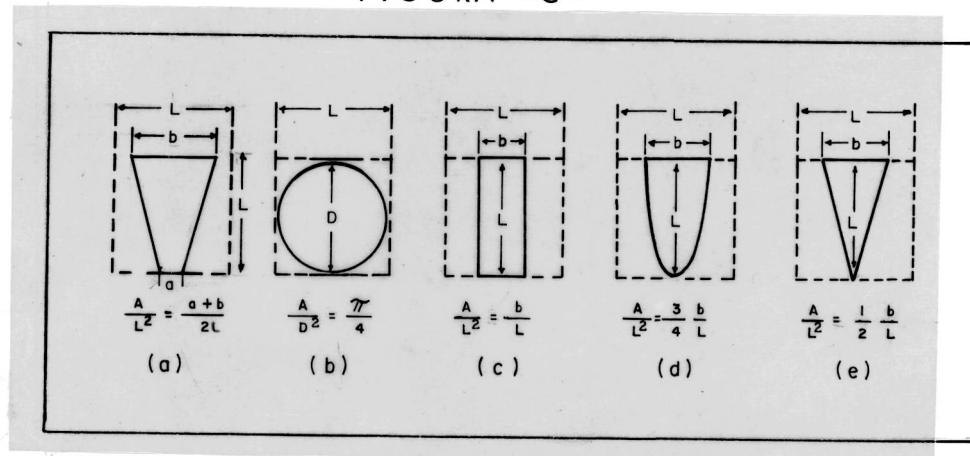
8.1 Relación entre las longitudes del canal principal y las áreas de drenaje.

La forma de la proyección horizontal de la divisoria y la superficie por ella encerrada, pueden ser deducidas de modelos cartográficos a escala ; la última se obtiene por planimetría y se conoce también como el área de la cuenca.

La configuración formal de las cuencas está íntimamente relacionada con la evolución del sistema fluvial (crecimiento de la red, capturas, relieve etc.) y sin duda, muchos de estos elementos están a su vez gobernados por elementos probabilísticos, siendo los estados presentes solo desviaciones de una tendencia configurativa media. En la naturaleza sin embargo, se reproducen las estructuras fluviales a diferentes escalas geométricas, dentro de medios similares o no y a distintas escalas de tiempo. Dentro de ellas es factible además, establecer un cierto grado de analogías en sus desarrollos geométricos. Es interesante analizar y comparar estos aspectos formales en cuencas hipotéticamente simples, como los mos

trados en la figura C, con los de cuencas naturales para deducir cual es el orden de esas semejanzas .

FIGURA -C-



Formas geométricas simples de cuencas hipotéticas.

Si existiese completa similitud geométrica entre estas diferentes morfologías, se tendría en todos los casos:

$$\frac{A}{D^2} \simeq \left(\frac{A}{L^2} \right)_{a,b,c,d,e} = \text{constante} \dots\dots\dots (16)$$

Esto no es lo que se deduce de las diferentes relaciones A/L^2 para las formas aca consideradas. Una comparación cualitativa con el comportamiento de cuencas naturales lleva a establecer que:

- a) En ambos casos se produce una elongación en el sentido del eje principal (coincide con el eje principal de drenaje) conforme se incrementan las áreas.
- b) En ambas se produce una mayor simetría geométrica respecto a dicho eje, que ante cualquier otro.

Datos de mediciones en cuencas naturales de diferentes formas y tamaño, permiten obtener el comportamiento en el Gráfico N° 9, al cual es de la forma analítica.

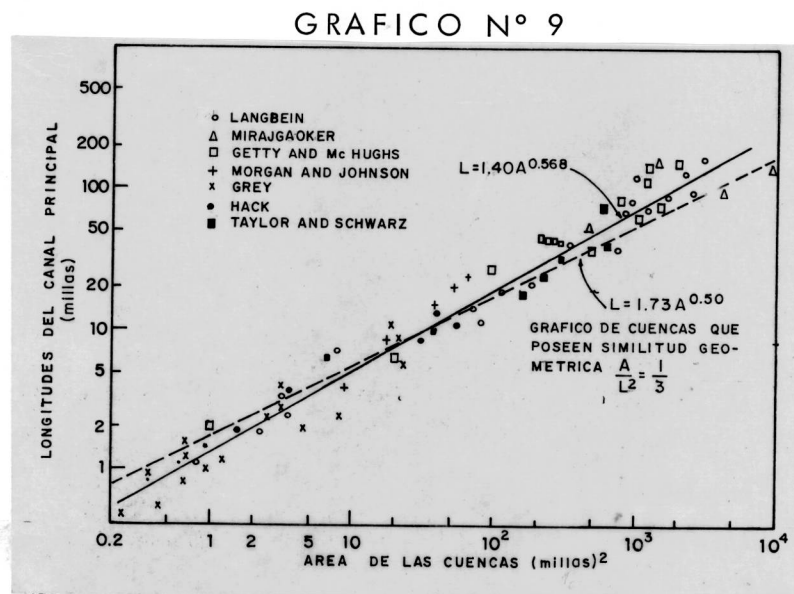
$$\frac{A}{L^2} = \frac{1}{2} A^{-0.136} \dots\dots\dots (17)$$

que tambien puede expresarse como:

$$L = 1.4 A^{0.568} \dots\dots\dots (18)$$

$$S(y) = 0.25$$

Esto confirma lo establecido en (a) mientras que la pendiente de la recta es mayor que 0.50.



Relación entre las longitudes de los canales y áreas drenadas. Caso particular de completa similitud.

La línea a trazos señala el comportamiento para cuencas con similitud geométrica tal que:

$$\left(\frac{A}{L^2} \right) = 1/3 \dots\dots\dots (19)$$

En una de las más grandes cuencas de Venezuela (22500 Km²) drenando en un alto % rocas sedimentarias de carácter arcillosas, el contorno de la divisoria refleja una configuración similar en su desarrollo, al caso (b) fig. C., con una tendencia a la elongación anormalmente extraña en un sentido transversal al drenaje del río Unare, verificándose para la parte meridional de la hoya:

$$\left(\frac{A}{D^2} \right) = 0.785 \dots\dots\dots (20)$$

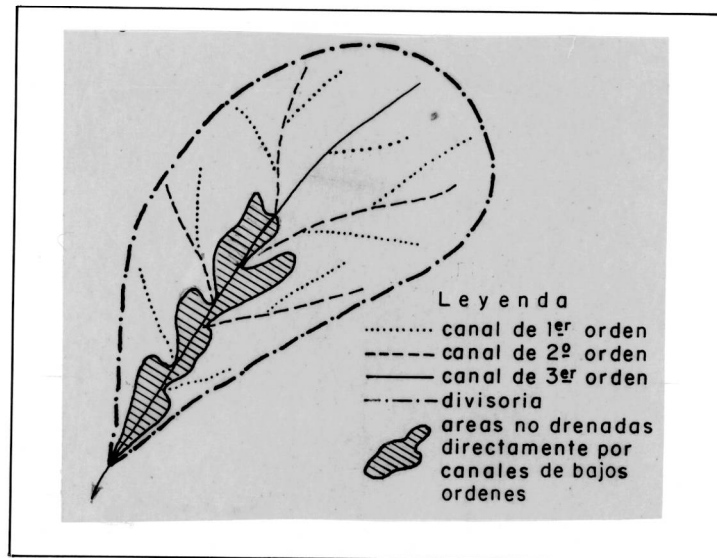
de lo cual puede deducirse (véase ec. N°16) la alta similitud geométrica con el patrón circular considerado.

8.2 Constante de Mantenimiento de los Canales

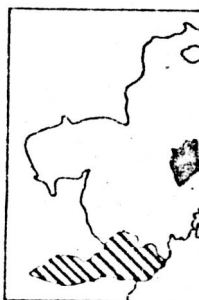
Relaciones del tipo (18) no solamente establecen correspondencia entre las variables geométricas de las cuencas, sino que ellas llevan a inferir otras consecuencias de mayor interés relacionadas con la evolución de los canales y la generación de escorrentía superficial. Así, cuando se considera la contribución de escurrimiento desde un área unitaria de la cuenca, se tiene el intercepto en el eje de las longitudes -1,4-, que representa la extensión promedio del canal que es "sostenida" por el su-

ministro desde dicha área. Esto llevó a Schumm, a definir el concepto de constante de mantenimiento del canal, el cual tiene significación respecto a las condiciones límites en extensión, requeridas para producirse escorrentía superficial, la densificación de las redes y procesos erosionales directamente ligados a la acción de esos flujos. En muchas cuencas de bajo relieve, un alto porcentaje de la superficie puede no ser drenada directamente por canales definidos, esto es más cierto en las márgenes de valles y bordes de planicies fluviales (Fig. D), que es donde se produce el mayor almacenaje subsuperficial y también donde el cauce principal exhibe su mayor desarrollo

FIGURA -D-



Áreas no directamente drenadas por canales de escorrentía en una cuenca hipotética.



Mar Caribe

BARCELONA

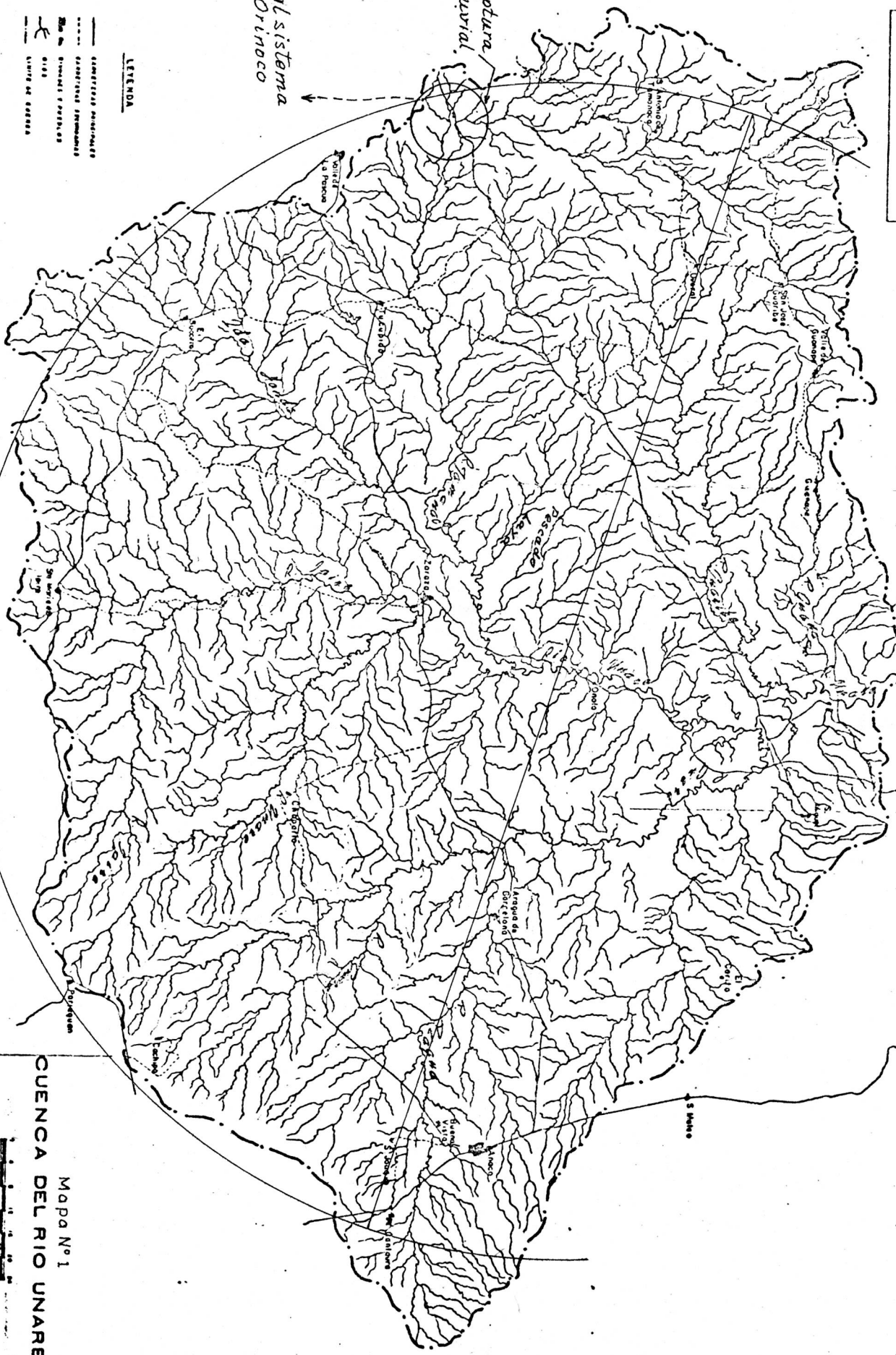
San Juan Cruz

Comarca de la Cruz

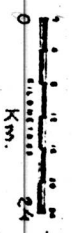
Captura
fluvial

al sistema
Orinoco

- LEYENDA**
- límites administrativos
 - límites de posesión
 - límites de posesión
 - límites de posesión

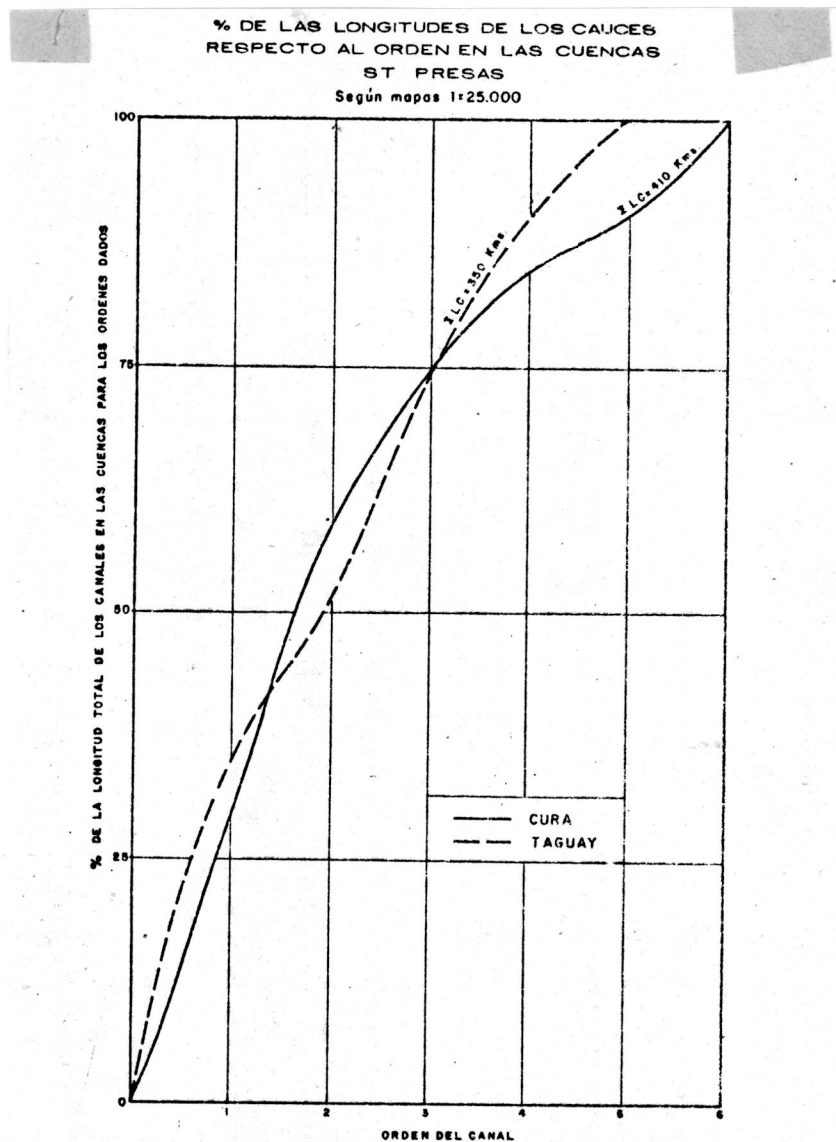


Mapa No 1
CUENCA DEL RIO UNARE



Es de destacar además, la importancia relativa que tienen canales de diferentes órdenes, como medios de lograr una eficiencia sobre el drenaje superficial. El Gráfico N° 10 muestra una relación entre los porcentajes de áreas y el número de canales de un orden dado para la cuenca del río Cura y Taguay en la Cordillera de la Costa, destacándose la importancia de aquellos canales de bajos órdenes.

GRAFICO N° 10



8.3 Radio de Elongación

La relación entre el diámetro de un círculo, que tenga la misma área equivalente a la cuenca respecto a su longitud, se denomina radio de elongación:

$$R = \frac{D}{L} = \frac{1}{L} \left(\frac{4}{\pi} A \right)^{1/2} \dots\dots\dots (21)$$

que conduce en combinación a (18):

$$R = 0.805 A^{-0.068} \dots\dots\dots (22)$$

confirmándose el hecho, de un aumento de la elongación de la cuenca al aumentar el área drenada. Se ha encontrado que este índice está relacionado con el relieve de la cuenca, valores unitarios corresponden a cuencas de regiones llanas, mientras que en zonas de alto relieve se han reportado valores en el rango de 0,6 - 0,8.

8.4 Radio de Bifurcación

Es la relación entre el número de los canales de un orden dado n y el número de aquellos de orden $(n + 1)$.

$$R_f = \frac{\sum n_a}{\sum (n_a + 1)} \dots\dots\dots (23)$$

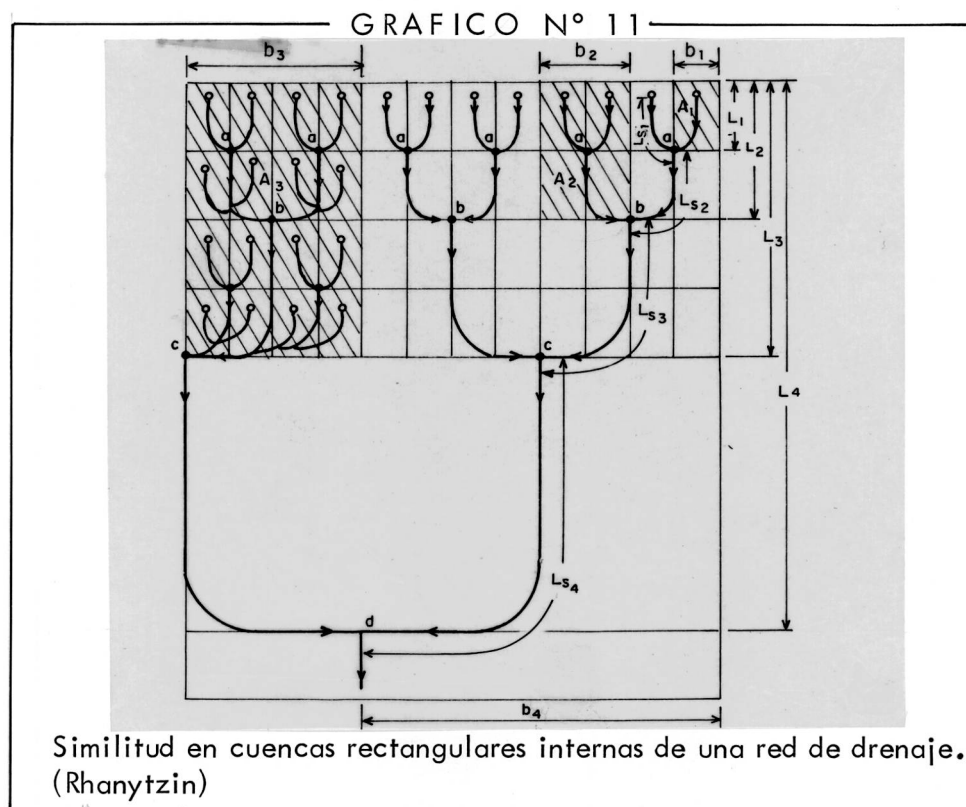
Este índice como el anterior, es una medida del grado de espaciamiento de los canales y los valores normales en las cuencas oscilan en el rango 2.0 - 4.0.

9. EVOLUCION Y ESTRUCTURAS DE LAS REDES DE DRENAJE

Hemos visto que las cuencas no guardan completa similitud geométrica, esto sin embargo puede obviarse en cierto grado, como una forma que nos permita explorar en algún detalle analítico, algunas relaciones que controlan el desarrollo y las estructuras de la red de drenaje, dentro de ciertos sistemas idealizados de cuencas.

9.1 Ley de las Areas de Drenaje

Una forma simple del desarrollo de la red de drenaje, es la adoptada para una configuración rectangular, en la cual las áreas drenadas por cada canal de un orden dado, tienen sus dimensiones constantes y especificadas como se muestra en el Gráfico N° 11.



En este caso se tiene, siguiendo a Eagleson (1):

$$L_{si} = L_i \dots\dots\dots (24)$$

$$L_{su} < L_u \dots\dots\dots (25)$$

Para un área genérica se cumple:

$$A_u = m b_u L_u \dots\dots\dots (26)$$

$$A_u = b_u L_u \quad [m = 1 : \text{área rectangular}] \dots\dots\dots (27)$$

Debido a la similitud:

$$A_{u+1} = 2 m b_u L_u + 1 = 4 m b_u L_u \dots\dots\dots (28)$$

y sucesivamente:

$$A_{u+2} = 4 m b_u L_u + 2 = 8 m b_u L_u + 1 = 16 m b_u L_u \dots\dots\dots (29)$$

Deduciéndose:

$$R_a^r = \frac{A_{u+r}}{A_u} = 4^r \dots\dots\dots (30)$$

La cual, cuando se aplica a las áreas promedios, se conoce como la ley de las áreas de los canales, atribuida su deducción a Schumm.

Una completa similitud requiere entonces, que la expresión (30) siga una secuencia de la forma:

$$4^0, 4^1, 4^2, 4^3, \dots\dots\dots, 4^{n-1} \dots\dots\dots (31)$$

En el Gráfico N° 12 se indican valores de esta razón respecto al orden de las corrientes en diversas cuencas y se infiere tanto completa ($R_u = 4$), como no completa similitud, la última condición exige entonces que:

$$A_u + 1 = m_u + 1 \quad t_b \quad b_u S_e L_u = \frac{m_u + 1}{m_u} \quad t_b \quad S_e A_u \dots\dots\dots (32)$$

$$\text{ó sea:} \quad R_a = \frac{m_u + 1}{m_u} \quad t_b \quad S_e \dots\dots\dots (33)$$

Debido a la simetría respecto al eje longitudinal de drenaje, puede asumirse $t_b = 2$ y si se consideran áreas constantes ($m = \text{const}$):

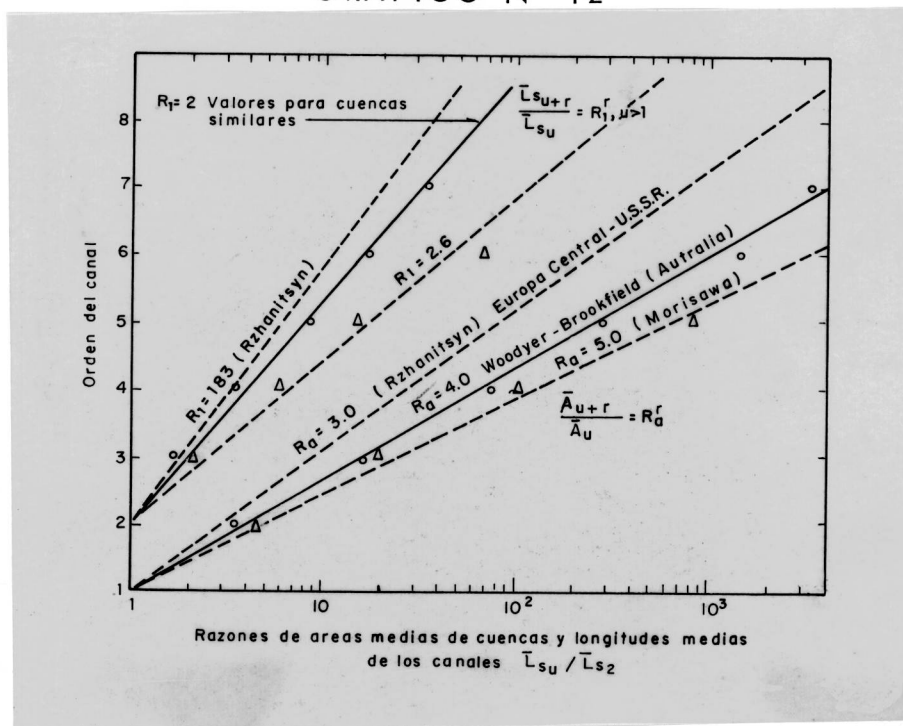
$$\text{cuando } R_a < 4 \text{ y } S_e < 2 \dots\dots\dots (34)$$

se concluye que las áreas se están haciendo menos elongadas, al aumentar el orden de las corrientes.

$$\text{y cuando } R_a > 4 \text{ y } S_e > 2 \dots\dots\dots (35)$$

entonces las cuencas de mayor orden, se están haciendo más elongadas que las de menor orden, esta es la situación real en hoyas que se desarrollan después de una zona con gradiente topográfico transicional como un pie de monte, por ejemplo. El Gráfico N° 12 también ilustra que las mediciones de Rhanitzin satisfacen la condición $(m_u + 1)/m_u < 1$, conforme aumentan los órdenes de las cuencas, mientras que un incremento de R_a se confirma para cuencas de menor orden (Morisawa).

GRAFICO N° 12



9.2 Ley de las Longitudes de los Canales

Procediendo en forma análoga para la relación de las longitudes medias de canales de órdenes $u + 1$ a las de orden $-u-$, del Gráfico N° 11 se tiene:

$$\frac{L_{u+1}}{L_u} = R_e = 2 \quad \dots \dots \dots (35)$$

y en general:

$$\frac{L_{u+r}}{L_u} = R_e^r ; u > 1 \quad \dots \dots \dots (36)$$

La cual para completa similitud debe verificar:

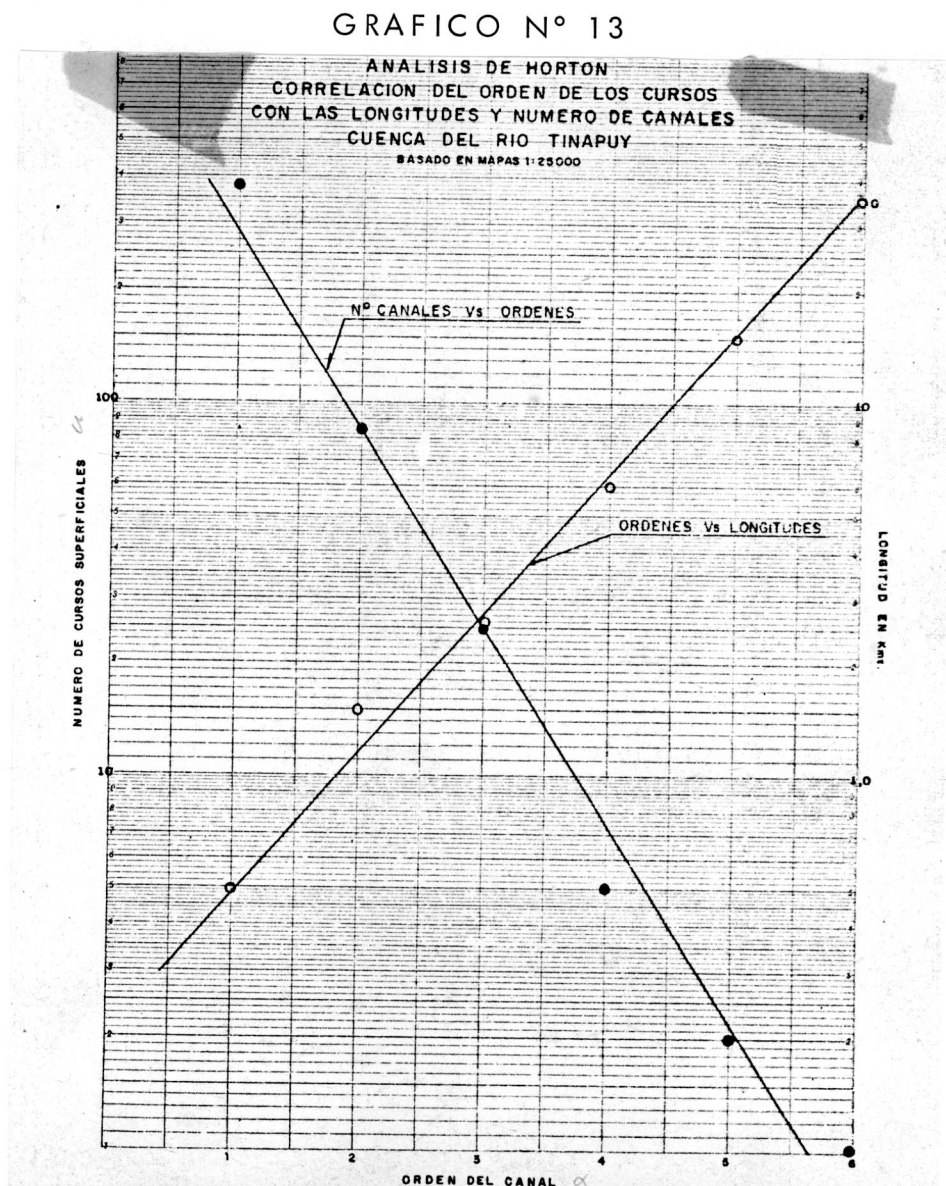
$$R_e^r = 2^r \quad \dots \dots \dots (37)$$

Es interesante destacar que el orden de variación de Re en el Gráfico N° (12), sea en un rango relativamente limitado, ó sea:

$$2.60 > Re > 1.83 \dots\dots\dots (38)$$

9.3 Ley del Número de los Canales

Cuando se representan a escala semilogarítmica las relaciones, número de canales de una cuenca respecto a sus órdenes, se obtienen tendencias lineales (Gráfico N° 13).



que siguen un comportamiento analítico del tipo:

$$u = \bar{R}_b^{\alpha-u} = \left[\frac{\sum n_\alpha}{\sum (n_\alpha + 1)} \right]^{\alpha-u} \dots \dots \dots (39)$$

Diversos investigadores han encontrado que el valor del radio de bifurcación $\bar{R}_b$, es independiente de las variables hidrológicas, así como del medio físico, variando normalmente en el rango $5 > R_b > 3$, con valores medios cercanos a 4. Ello condujo a Shreve, a pensar que esta ley podría ser el resultado estadístico del muestreo aleatorio, en una población de patrones con configuraciones topológicas y órdenes diferentes, lo cual confirmó más tarde representando histogramas de frecuencia para 246 diferentes patrones, concluyendo que los estados más probables obedecían a la ecuación (39), con un R_b más próximo a 4, conforme aumentaban los órdenes de las cuencas.

Para patrones con n_f canales de primer orden, el estado más probable con un orden α , es aquel que determina un $R_b \simeq 4$, deduciéndose de (39):

$$\bar{R}_b = n_f^{\frac{1}{\alpha-1}} \dots \dots \dots (40)$$

9.4 Densidad de Drenaje

El inverso de la constante de mantenimiento de los canales fué anticipado por Horton para definir el concepto de densidad de drenaje. Diversos factores tanto del sistema físico (permeabilidad, cohesión, resistencia litológica) y otros factores geológicos de las cuencas, así como del

comportamiento de la escorrentía (condición del flujo) influyen sobre esta característica de las cuencas y sus redes.

Por definición:

$$D = \frac{1}{C_m} = \frac{L_s}{A_\alpha} = \frac{\sum_{u=1}^{\alpha} \sum_{j=1}^{L_u} L_{suj}}{A_\alpha} \dots\dots\dots (41)$$

usando las ecuaciones (36) y (39) se tiene:

$$\sum L_s = \sum_{u=1}^{\alpha} L_{si} R_b^{u-1} R_b^{\alpha-u} = L_{si} R_b^{\alpha-1} \left[1 + \frac{R_e}{R_b} + \frac{R_e^2}{R_b^2} + \dots + \frac{R_e^{\alpha-2}}{R_b^{\alpha-2}} + \frac{R_e^{\alpha-1}}{R_b^{\alpha-1}} \right] \dots\dots(42)$$

que junto con (30) dá:

$$D = \frac{L_{si}}{A} \delta^{\alpha-1} \frac{\theta^{\alpha-1}}{\theta-1} \dots\dots\dots (43)$$

$$\text{siendo: } \delta = \frac{R_b}{R_a}; \quad \theta = \frac{R_e}{R_b} \dots\dots\dots (44)$$

si se asume similitud geométrica, se tiene: $\delta = 1$; $\theta = 0,5$; $A = \frac{1}{3} L^2$

obteniendo finalmente para (43):

$$D = \frac{6}{L_1} \left(1 - \frac{1}{2^\alpha} \right) \dots\dots\dots (45)$$

A partir de esta expresión es entonces factible determinar, cuanto es la longitud media del flujo superficial en un sistema de drenaje:

$$L_u = \frac{1}{2D} = \frac{L_1}{12 (1-2^{-\alpha})} \dots\dots\dots (46)$$

Horton ha considerado el efecto de las pendientes en las superficies adyacentes a los sistemas de canales $-S_s-$ y las pendientes en éstos $-S_c-$, obteniéndose finalmente:

$$L_M = \frac{1}{2 D (1 - S_s / S_c)^{1/2}} \dots\dots\dots (47)$$

9.5 Configuración de los Canales Naturales

El aspecto morfológico que ofrecen a grandes rasgos los canales se denomina patrón de los canales y se han reconocido las siguientes formas: rectas, ameandreadas, anastomosadas ó interdigitadas. No existen francas diferencias entre estos patrones, en realidad la naturaleza modela a diferentes escalas de tamaño formas que pueden catalogarse de un tipo dentro de otras; así en tramos locales de cualquier canal de lecho arenoso a microescala, se pueden observar formas anastomosadas en bajos caudales, que no podrían detectarse a través de aerofotos por ejemplo, los patrones de canales se pueden interpretar, como formas resultantes del reajuste de las diversas variables que intervienen en los mecanismos de escorrentía y transporte sólido, a través de contornos variables. Existe una enorme literatura y muchas hipótesis, que pretenden explicar los procesos que determinan a estos patrones, pero aun cuando se han asociado a limitados factores de control, muchas de ellas no son concluyentes y factibles de generalización. A pesar de que se ha escrito mucho sobre el patrón ameandreado y ellos han sido estudiados tanto en cauces naturales como en los laboratorios, no conocemos por ejemplo, cual es la razón por lo cual un río

Se ha introducido el concepto de sinuosidad, definido como la relación entre la longitud del canal y la longitud reducida del valle en un tramo, para diferenciar a los canales sinuosos de los ameandreados, este varía normalmente entre 1-5 considerándose a los del último tipo, como aquellos que tienen sinuosidades mayores de 1.5, los de valores más bajos son canales rectos ó sinuosos. Los canales anastomosados ó interdigitados, se forman por divisiones y uniones sucesivas de diferentes cauces dentro del lecho ó bordes del canal. Los bancos y riberas de estos son inestables y poco definidos, siendo las acumulaciones centrales ó laterales, destruidas normalmente en altos flujos.

La nomenclatura y definición de las estructuras y depósitos desarrolladas en canales sinuosos y ameandreados se ilustra en la Figura E.

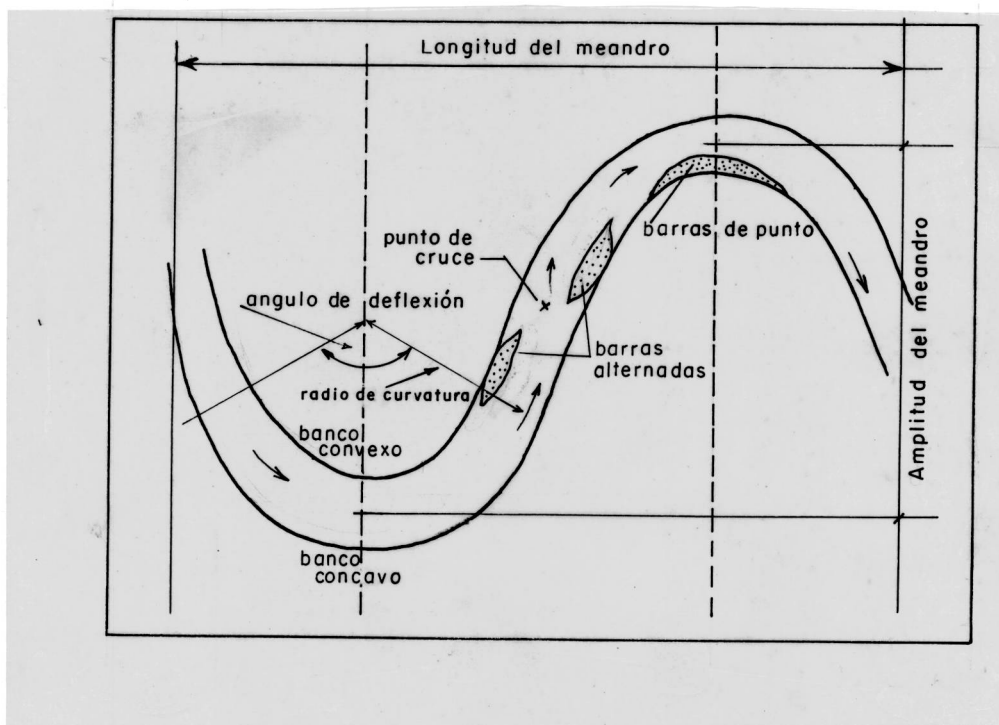
Las formas exhibidas por los canales naturales además de reflejar muchas características tanto del transporte como de las propiedades de los sedimentos aluvionales y las condiciones del flujo, tiene gran importancia práctica para el aprovechamiento de los ríos desde el punto de vista del control de crecientes, navegación, recuperación y drenaje de tierras, así como en los usos del agua con propósitos múltiples. Desde el punto de vista hidráulico, ello determina en gran parte la rugosidad natural de los canales.

9.6 Barras Arenosas

En ríos aluvionales con sedimentos predominantemente arenosos se desarrollan estructuras tridimensionales conocidas como barras areno-

sas y aparecen normalmente, en canales naturales con altas relaciones ancho/profundidad. Ellas se han clasificado en los siguientes tipos atendiendo a la posición que ocupan sobre el canal: de punto, medias y alternadas. (Figura E.)

FIGURA -E-

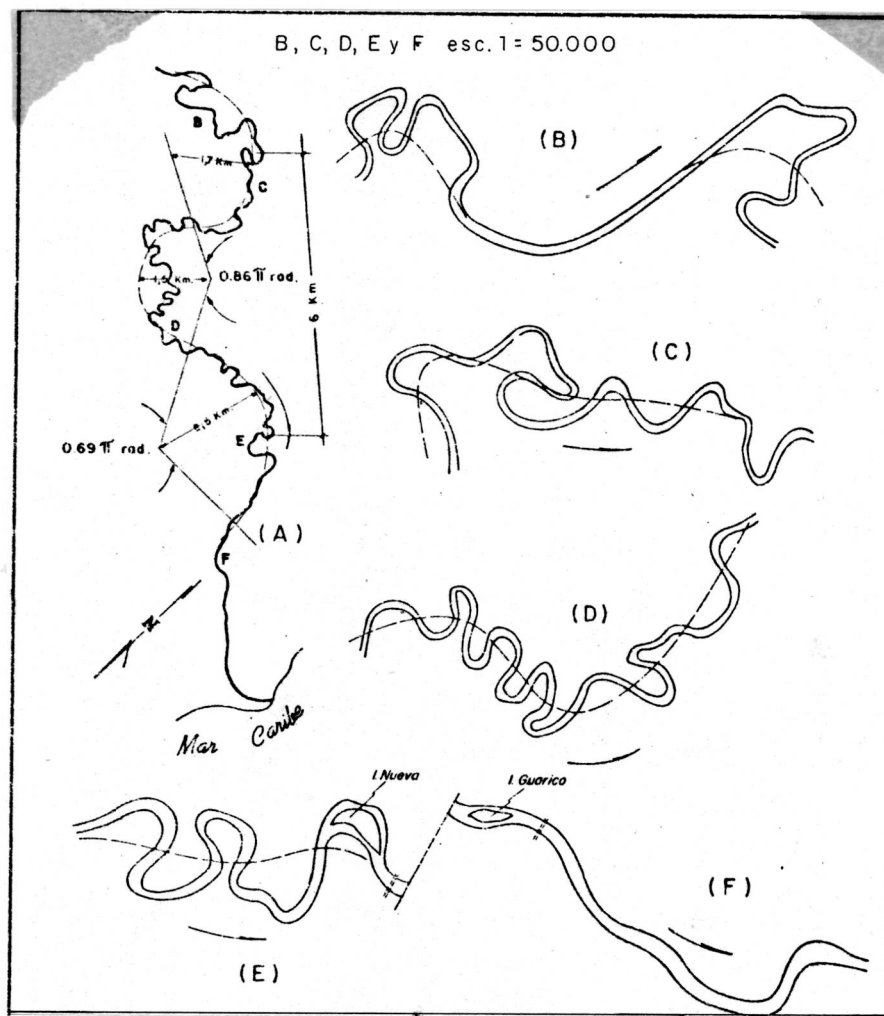


Definición de las partes de un meandro.

Estas estructuras son más comunes en ríos sinuosos que en aquellos rectos y ellas determinan, tanto la geometría de las secciones como las características del flujo y transporte sólido. En los tramos inferiores de los grandes ríos de Venezuela como el Caura, Aro, Apure, Orinoco y otros, estas son las formas fluviales más conspicuas, especialmente en los últimos dos, donde su equilibrio ó movilidad determina la estabilidad de

forma un patrón geométrico tan particular. Algunos canales artificiales permanecen rectos durante largos años de operación, mientras que otros divagan activamente en cortos lapsos de funcionamiento. Algunos ríos forman configuraciones muy interesantes, el Neverí por ejemplo en los sectores bajos, desarrolla un patrón sinuoso irregular superpuesto a amplios lazos de la planicie fluvial, tal como se ilustra en el Gráfico N° 14.

GRAFICO N° 14



Patrones de meandros en el río Neverí. Tramo inferior. Nótese la superposición del patrón sinuoso del canal, sobre lazos amplios de la planicie fluvial.

los canales. Estas barras cobran la máxima expresión en altos niveles, cuando una complejidad de formas conectadas a través de bifurcaciones y uniones de canales internos, producen formas múltiples de este tipo, lo cual es indicativo de la alta dinámica de estos ríos.

Barras arenosas centrales y alternadas sobre el cauce principal, muestran de otra parte alta movilidad aguas abajo, como la observada en la estación fluvial de Musinacio (bajo Orinoco), la cual ha avanzado a una rata de 10 m/año en los últimos 5 años.

La complejidad morfológica de estas estructuras fluviales, se hace mayor justo en las confluencias de estos grandes ríos, como en las de Apure-Orinoco, Caura-Orinoco, Aro-Orinoco etc. y desaparecen ó son poco expresivas, en tramos de régimen torrencial o áreas de saltos, rápidos y raudales. En zonas distantes de los canales, estas barras se han hecho permanentes a semipermanentes como resultado quizás, de la protección vegetal y a la migración activa de los cauces principales, hacia otros sectores de las planicies fluviales.

9.7 Planicies Fluviales

La planicie fluvial como estructura deposicional es una estrecha franja marginal a los canales, la cual es periódicamente afectada por los flujos de avenidas. Muchas de las partes que la forman, poseen una nomenclatura definida, aunque sus desarrollos y formación no sean a veces suficientemente bien establecidas. Entre estas partes se tienen:

- a) El canal natural y sus bifurcaciones
- b) Lagos oxbow, que son cortes a veces simétricos de los lazos de meandros, ellos mantienen almacenamientos superficiales durante los períodos de altos niveles.
- c) Barras fluviales.
- d) Espirales de meandros, elevaciones y depresiones alternadas que se producen en los lazos convexos de meandros conforme el canal migra aguas abajo y lateralmente hacia el banco cóncavo.
- e) Estancamientos de agua formando depresiones centrales y en partes laterales del canal, son formadas por socavación local.
- f) Diques naturales, estructuras formadas por el suministro de sólidos hacia la planicie, por contribuyentes ó como resultado de los desbordes del cauce principal en altos flujos.
- g) Antepantanos: depósitos de sedimentos finos acumulados entre los diques naturales y el borde de la planicie, dispuestos normalmente en zonas depresivas ó antiguos canales marginales.
- h) Depósitos de arenas y gravas distribuidos en forma aleatoria sobre la planicie.

La formación de estos elementos de la planicie fluvial, esta íntimamente relacionada con el desarrollo del canal, fuentes de suministro, carácter del sedimento y cobertura vegetal, básicamente. Las planicies fluviales más amplias y desarrolladas se forman normalmente en tierras muy planas: en U.S.A., se ha mencionado, que las más expresivas corresponden a ríos que tienen una alta capacidad de transporte de materiales gruesos, situación que parece contraria a la de los ríos tropicales nuestros, donde la evolución y desarrollo de las planicies esta ligada mas íntimamente a la presencia del sedimento fino. Para definir la planicie fluvial en términos hidrológicos más objetivos así como su evolución, se ha pre-

tendido relacionar la capacidad del canal a capacidad llena con el período de retorno correspondiente a esos caudales, mientras que la periodicidad de estos flujos es efectivamente lo más importante como formadores de las principales estructuras marginales al canal. En U.S.A., se ha encontrado que en ríos con planicies fluviales bien definidas el intervalo de recurrencia es de 1-2 años, mientras que en algunos ríos de Inglaterra, Nixon (1959) determinó en forma independiente, que este caudal correspondía al 0.6% de la curva de duración de caudales, lo cual da una ocurrencia de 0.006×365 ó sea 2.2 veces/anuales.

En muchos de nuestros ríos con planicies bien desarrolladas, los mecanismos de formación pueden ser diferentes debido al régimen hidrológico y otras condiciones ambientales. Ríos como el Apure y Orinoco, que remansan sus tributarios durante el largo período lluvioso, conlleva a un desarrollo de los depósitos fluviales en forma activa y si bien es cierto que la hidráulica del canal, controla las condiciones de desbordamiento hacia la planicie, no es menos cierto que en su desarrollo, la persistencia de los niveles, puede ejercer un efecto más marcado sobre la evolución de ella, mientras que esto determina mejores condiciones para el atrape y deposición del sedimento especialmente fino, y también para que los suministros de tributarios rebalsados, se acumulen en áreas marginales a los cauces, ello al menos es lo que se observa, en muchos de los ríos nuestros.

La planicie fluvial de grandes ríos como el Orinoco ofrece rasgos distintivos de una a otra región. En los tramos bajos que es donde está

más desarrollada, presenta anchos máximos normales hasta de 25 Kms, extendiéndose varios más, al rebalsar caños y ríos contribuyentes, en una interconexión compleja durante el período lluvioso. El sector mostrado en el mapa 2, ilustra algunas de las formas fluviales más características, destacándose las barras que se producen a intervalos comprendidos entre 5-10 Kms, siendo su desarrollo mayor en las confluencias con otros grandes ríos. Por razones de estabilidad litológica, la margen izquierda se mantiene estable, siendo la tendencia del cauce a desplazarse hacia el Sur, sin embargo algunos tributarios (Mapire por ejemplo) siguiendo una orientación del drenaje que coincide con una zona inestable, tal vez una franja del desarrollo antiguo de la parte convexa del lazo de la curvatura, se mantiene paralelo a la orientación del canal, habiendo interceptado a otros tributarios menores.

El estudio de las planicies fluviales en cauces naturales con diferentes climas y condiciones geológicas, es uno de los aspectos que requieren de más investigación en mecánica fluvial, particularmente en el presente, cuando el desarrollo y el urbanismo en muchos países, se orienta al aprovechamiento y uso de estas áreas tan complejas, desde el punto de vista geomórfico e hidrológico.

10. INFLUENCIA Y SIGNIFICANCIA DE LAS VARIABLES GEOMORFICAS

En geomorfología las variables que intervienen para definir el comportamiento de un sistema fluvial son de diversa naturaleza y se han agrupado en tres tipos, Davis (1899). Estas son las relacionadas con los procesos, las estructuras y

los estados de desarrollo (stage) del sistema.

Los primeros agrupan a todos aquellos mecanismos que determinan las formas particulares del relieve. -Los canales naturales son meros accidentes geomorfológicos - una parte relativamente pequeña del área de la cuenca -, cuyas formas y estructuras dependen en gran parte, de como actúen los procesos erosionales y/o deposicionales; un río puede mostrar contrastes notables en el carácter de los materiales aluviales, cantidad de material transportado, morfología y grado de desarrollo, si solo un factor climático es el que condiciona su evolución, así, significativas diferencias en estos aspectos, pueden detectarse en ríos aún de una misma región con un similar rendimiento líquido, cuyos flujos de suministro provienen de procesos ya sea de deshielo ó precipitación. Erróneamente, se ha pretendido en algunos casos, asignar a un tipo morfológico del relieve, una dependencia y asociación directa con un clima característico, a estas zonas se han designado con el nombre de regiones morfoclimáticas, ello ha dado como resultado, no pocas confusiones atribuibles al deficiente conocimiento de las verdaderas relaciones causas-efectos, respecto al origen. Tales formas morfológicas del relieve en forma de cuevas, mesas y monolitos, se han asociado a climas particulares, cuando ciertamente ellos son resultado de la anisotropía e inhomogeneidad litológica ó del carácter de las fuentes de suministro.

Aun cuando las regiones con cierta homogeneidad climática, están caracterizadas por muchos rasgos comunes en el relieve y esto conlleva

a similitudes en los sistemas fluviales que en ellas ocurren, es obvio que aparezcan diferenciaciones, como resultado de la real interrelación de estos procesos con otros fenómenos naturales, lo cual determina diferentes respuestas en el comportamiento morfodinámico del sistema fluvial. En otras palabras, formas geomórficas similares ó distintas, pueden aparecer en zonas con diferentes tipos climáticos, dependiendo de muchos otros factores.

En combinación a los agentes exógenos (clima) que actúan sobre el contorno del sistema, se produce la acción de fuerzas internas que contribuyen a determinar la configuración del relieve y las formas de las tierras. Estas actúan en una forma latente, pero activamente a través del tiempo geológico y son responsables, del patrón estructural de las grandes cadenas montañosas y la configuración geomórfica a macroescala. Es notoria en diferentes partes del mundo, la importancia de estos mecanismos sobre la evolución de lagos, valles, cadenas de montañas y aun dislocaciones y reorientaciones de los sistemas fluviales. El fallamiento tectónico de grandes bloques dentro de la cordillera de la costa, ha sido responsable de la formación de valles intermontanos de las cuales, los de Aragua y del Guaire (Caracas) son los más expresivos, el origen de altos estructurales y capturas fluviales y otras, son algunas de las manifestaciones de éstos efectos a partir del terciario. La magnitud de estas fuerzas internas hace que corrimientos o fallas geológicas sean activadas, lo cual puede causar cambios en los procesos que controlan la estabilidad y el suministro

tro sólido a las corrientes fluviales (deslizamientos, asentamientos gravitacionales, creptación etc.). En otros casos, las evidencias directas de estos efectos solo se detectan en largos períodos de tiempo, mientras que las ratas medias de emergencia tectónica son relativamente pequeñas (≈ 1 m/siglo, en cadenas de montañas jóvenes), al igual que las de denudación general. En los casos más comunes, la intervención humana puede introducir y causar cambios a pequeña escala, de mayor significación.

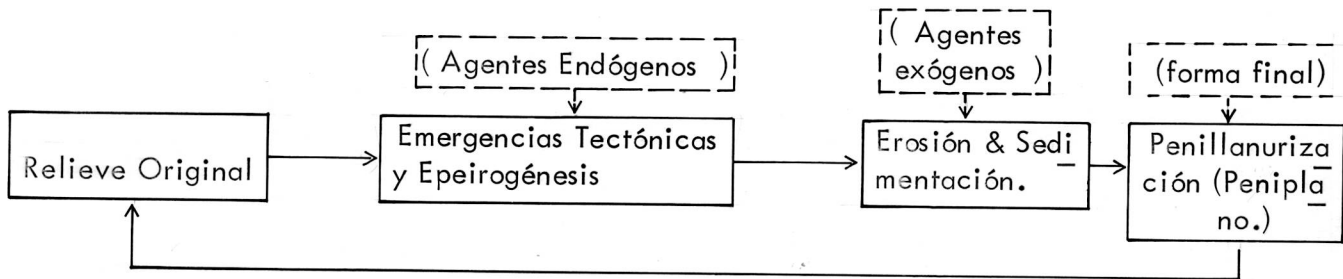
Variables Estructurales: Con éstas se desea destacar y definir, no solamente el tipo y consistencia litológica sino el arreglo y patrón estructural de los materiales formacionales, lo cual condiciona a su vez, la aleotropía y grado de homogeneidad del sistema físico. Una uniforme distribución y predominio de formaciones geológicas, determina analogías en el carácter y patrón de las redes de drenaje, ratas de suministro sólido y otros caracteres fluviales.

Las diferencias entre los efectos ya sean derivados de las propiedades intrínsecas de las rocas ó de su disposición espacial, son responsables de rasgos distintivos en la evolución geomórfica. El desarrollo del valle del Neverí por ejemplo, formado por la disección geológica profunda de un río que cortó, paquetes sedimentarios en un sentido paralelo a las estructuras geológicas mayores, muestra diferencias notables de aquellos sistemas, que han evolucionado y formado sus vertientes en áreas adyacentes drenando directamente al Mar Caribe, ó hacia los llanos. La configuración y densidad del drenaje reflejan las propiedades y el carácter litológico; zonas de poca resistencia a la erosión, mostrarían mayores ratas de suministro como densidades de drenaje, respecto a regiones geológicamente más estables. Una alteración local en las estructuras ó variaciones bruscas en la litolo -

gía, determinan a menudo, cambios repentinos en la morfología de las redes y el alineamiento preferencial de los sistemas, tales como la formación de saltos, rápidos y otros accidentes fluviales. En cuencas que han evolucionado hasta los últimos estadios de desarrollo (penillanurización) en el escudo precámbrico de la Guayana de Venezuela, estos accidentes son destacados: (ríos Caura, Paragua, Caroní, Aro etc) y en general, en la mayoría de las cuencas escapan de ser representados cartográficamente, pero ellos no solamente dentro de las zonas adyacentes a los canales, sino dentro del relieve general, adquieren una relevancia que pocas veces es considerada con la importancia que se merecen, a pesar de que ellos reflejan características del medio, de gran significancia para poder explicar el comportamiento fluvial de una a otra región.

Estado de desarrollo: El progreso del tiempo y las formas resultantes del relieve así como sus cambios a través del tiempo, se refieren al concepto de estados de desarrollo de una configuración geomórfica. Los sistemas fluviales evolucionan, más activamente de lo que es capaz de observar el hombre en su corta existencia ó a través de algunas generaciones. El ciclo idealizado de erosión propuesto por Davis, engloba solamente procesos a gran escala, enmarcados dentro de extensos períodos de tiempo y puede sintetizarse en la forma siguiente:

FIGURA -F-



Esquema simplificado del ciclo de erosión dentro de una escala de tiempo geológico.

No existe una continuidad real de estos procesos y la transferencia (evolución) no tiene que ser progresiva, dependiendo de la intensidad con que operen cada uno de ellos, tanto espacialmente como en el tiempo. Cuando se consideran magnitudes menores del último, entonces ciertos procesos recobran mayor significancia, como factores de la evolución. En muchas partes del mundo se ha reconocido la importancia de las glaciaciones cuaternarias sobre el comportamiento de los sistemas fluviales.

Enormes depósitos en terrazas fluvio-glaciáricas rellenan los fondos de valles en cuencas Andinas (Chama, Motatán). Mientras que el proceso de deglaciación se inició manteniéndose los niveles marinos a niveles inferiores a los actuales (150 m.b.n.m) y contemporáneamente, se producían emergencias geológicas graduales (prosигuen actualmente), es de inferirse que cambios significativos respecto a los actuales, debieron experimentar muchos sistemas fluviales en el mundo y en América. Los mayores gradientes fluviales de entonces, debieron obligar a muchos de nuestros grandes ríos en áreas aluvionales, a disectar profundamente

sus sedimentos que de otra parte, han de exhibir una granulometría más gruesa, los tributarios entonces, han debido señalar tanto mayores capacidades de transporte como ratas de suministro. En conclusión, la intensidad de estos procesos fué durante los últimos 10.000 años, de tal importancia que los enormes depósitos de terrazas y conos aluviales en el frente y pie de monte de nuestras cordilleras jóvenes (altos llanos occidentales, Sur del Lago, llanos altos de Monagas), son una consecuencia de los mismos. La disección más reciente de estos depósitos son un reflejo de la actividad tectónica, que origina una gradual activación de la erosión fluvial bajo gradientes fluviales mayores, originándose selectividad y gradación de los materiales, en respuesta a un mecanismo de transporte que ha dispuesto un mayor volumen de materiales finos (planicies fluviales actuales y recubrimientos superficiales al sur del llano y borde norte del Escudo de Guayana).

En adición a los procesos antes mencionados, actúan procesos de tipo molecular y químicos que condicionan la estabilidad litológica. Las fluctuaciones de temperatura causan gradientes térmicos en las rocas, que las disgregan y descomponen por expansión y contracción de los arreglos cristalinos, ó por el fracturamiento intergranular por expansión, al congelarse el agua en los poros. Estos operan por extensos períodos de tiempo pero al ser de carácter regional, tienen una gran influencia sobre la alteración de las rocas, tipos de suministro sólido y las formas resultantes, sí a ello se añade la acción química del agua asociada a soluciones mineralizadas y la actividad biológica de los organismos, se comprende que la acción de estos mecanismos en el tiempo, tiene enorme significancia sobre las formas resultantes.

Probablemente, uno de los rasgos geomórficos más interesantes de la evolución de las redes, y que ha llamado la atención de diversos profesionales de la ingeniería, sea el de las capturas fluviales (véase mapa 1). Estas resultan de mecanismos de ajuste de la naturaleza, para equilibrar la evolución y desarrollo de las redes, lo cual es inducido por la acción de uno ó el conjunto de los procesos analizados. Su estudio tiene la importancia, de llevar a conocer como interactúan los procesos naturales para originar estos cambios y adaptaciones, lo que tiene el mérito, no solamente de ayudar a comprender mejor la manera de operar la naturaleza, sino que ello puede conducir al profesional a ser tan prudente como ella, cuando procede artificialmente a introducir cambios en los sistemas fluviales. El Mapa N° 1 muestra la captura fluvial del alto tamanaco por el sistema de Unare que drena al Mar Caribe.

10.1 CARACTER DE LAS VARIABLES DENTRO DE LAS ESCALAS DE TIEMPO

Se ha establecido y existen pocas dudas, de que las formas geomórficas evolucionan históricamente y cambian con el tiempo. Esto es válido tanto para las estructuras constructivas del relieve como para las denudacionales. La significancia e intensidad que cobran las interrelaciones y efectos de las variables geomórficas dentro de las diferentes escalas de tiempo, es lo que es generalmente visualizado en diferentes perspectivas por profesionales de distintas especialidades, siendo en este punto, donde el geomorfólogo, hidrólogo e ingeniero hidráulico, transitan y eligen sendas separadas. La intención de este punto, es tratar de demostrar que esto no debería de ser así ó al menos destacar, que las concepciones generales no deben desligarse, al confrontarse al análisis de un problema.

ma ó aspecto relativo a cualquier sistema fluvial.

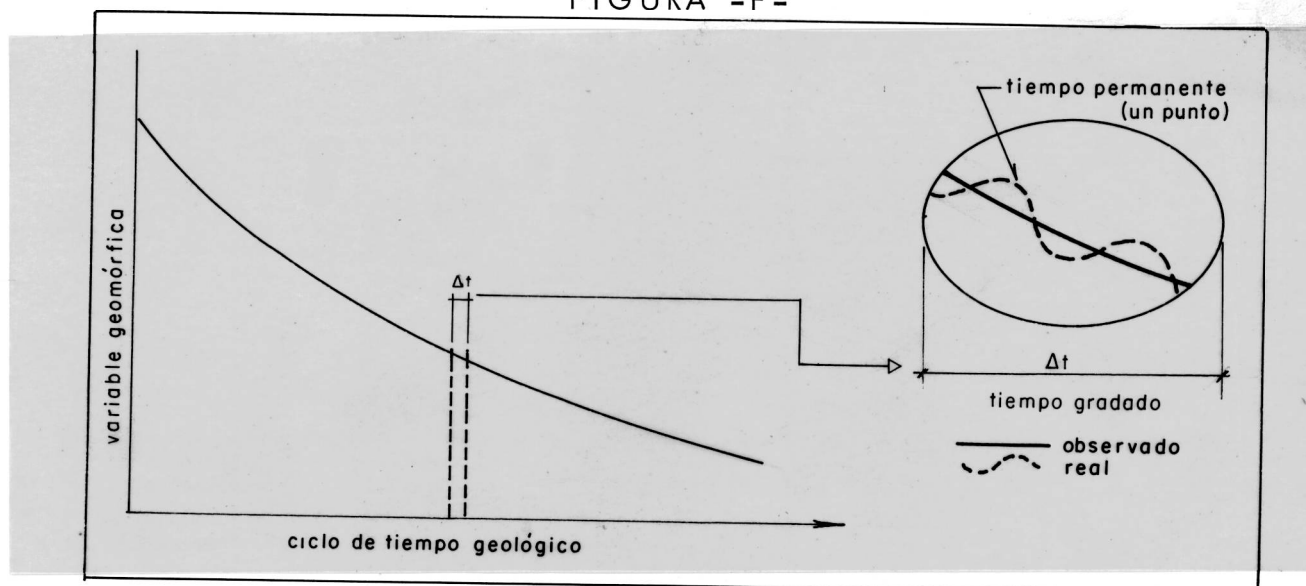
Cuando se reflexiona sobre el desarrollo y evolución de una cuenca hidrográfica, su relieve y la red de drenaje, es inmediato para el geólogo pensar en términos de largos períodos de tiempo: millones de años, un ciclo de erosión como lo concibió Davis (tiempo geológico). Durante este lapso es aparente que existen ajustes progresivos del sistema físico, en respuesta a las emergencias geológicas, la denudación, la acción del clima, transporte y deposición donde la energía de los gradientes en los mecanismos de transporte así lo determinen. Tales detalles escapan con frecuencia del interés ingenieril; sin embargo, es aparente que uno y otros coinciden en que, muchos sistemas fluviales (ríos, canales etc.) alcanzan estados temporales con duración definida en las cuales las variables que definen sus comportamientos, determinan una condición de cuasi-equilibrio dinámico, esto lleva al concepto de tiempo "gradado". Una relativa estabilidad de las condiciones climáticas puede originar que el suministro y las capacidades de transporte de un río, le lleven a formar depósitos aluvionales, propios para el almacenamiento subterráneo de las aguas ó a concentrar depósitos minerales que podrían ser detectados en el presente, con un interés práctico evidente, ó que lleven a definir la evolución climática en el pasado en términos de sus características morfométricas y ambientes deposicionales. En estos casos, la necesidad de analizar las formas como operaron las variables entonces como ahora, conduce a un más detallado conocimiento de la evolución del sistema fluvial y su comportamiento ante las perturbaciones naturales.

El interés en el diseño y operación de una obra hidráulica lleva finalmente

te, a la consideración de intervalos de tiempo límites con corta duración, en los cuales no operan cambios significativos en el sistema. Un canal con escorrentía y transporte sólido ó un modelo hidráulico calibrado a caudal constante, se comportarían como sistemas abiertos en estado estacionario ó permanente, lo cual sería del interés para el Ingeniero Hidráulico. A esta escala temporal menor de operación, se concibe como de tipo "permanente".

Lo importante de destacar a este nivel es que, la respuesta actual ó pasada del sistema fluvial, está encadenada a estados previos de su desarrollo y que las consecuencias inferidas en base a experiencias fundamentadas en la consideración del comportamiento momentáneo (tiempo permanente), no siempre tienen que operar en una dirección prestablecida y única, porque son demasiadas las variables que intervienen y ellas pueden afectar distintamente al sistema, según la magnitud y escala de tiempo considerada.

FIGURA -F-



Variación de una variable geomórfica según las escalas de tiempo.

La Figura E, ilustra como una variable geomórfica puede abarcar diferentes escalas de tiempo y cual es la amplitud de su variación cuando un ciclo de tiempo geológico, permanente ó gradado es considerado. En realidad, en muchos problemas prácticos el profesional debe confrontar la consideración simultánea de variables significantes dentro de estas escalas de tiempo. Cuando se bombea por ejemplo, un sistema de flujo subterráneo a una rata de descarga constante hasta lograrse la condición de equilibrio en el cono de abatimiento, se aplican expresiones analíticas, que definen la condición estacionaria en el campo de flujo, aquí la conductividad hidráulica, capilaridad, diámetro del pozo, contenido de humedad del suelo en la zona no saturada etc, se pueden concebir como variables significantes (aunque algunas no determinantes de la expresión considerada) a una escala de tiempo permanente, mientras que las morfológicas como espesores, topografía, gradiente topográfico, tienen significancia a escalas de tiempo gradado y finalmente, las que definen la estratigrafía regional de la cuenca: configuración del lecho rocoso, bordes del sistema de flujo, caen en la categoría de significantes a escalas de tiempo geológico. Así que, resulta interesante destacar la relevancia de las más importantes variables que condicionan la morfología y desarrollo de los sistemas fluviales, su grado de dependencia y sus importancias tanto desde el punto de vista ingenieril como científico. Schumm (11), ha hecho una jerarquización de las más significativas en mecánica fluvial, considerando su interdependencia dentro de los tres períodos de tiempo considerados y ello se ilustra en la Tabla N° 2.

TABLA N° 2

SIGNIFICANCIA DE LAS VARIABLES GEOMORFICO-FLUVIALES
SEGUN LAS ESCALAS DE TIEMPO
(SCHUMM)

Variables	(1) Geológico	(2) Gradado	(3) Permanente
(1) tiempo (stage)	I	N.S	N.S
(2) Relieve Inicial	I	N.S	N.S
(3) Geología (litología-estructura)	I	I	I
(4) Paleoclima	I	I	I
(5) Paleohidrología	D	I	I
(6) Relieve o volumen sobre el nivel de base	D	I	I
(7) Dimensión de los valles (ancho, profundidades, pendientes)	D	I	I
(8) Clima (temperatura, humedad, precipitación, etc.)	X	I	I
(9) Vegetación	X	I	I
(10) Hidrología	X	I	I
(11) Morfología de los canales	X	D	I
(12) Relaciones gasto sólido-líquido	X	X	D
(13) Hidráulica del flujo	X	X	D

N. S - no significantes;
I - Independientes;

D - Dependiente
X - Indeterminada

El tiempo, es la más significativa variable independiente al considerarse un período de tiempo geológico que se extendería desde el presente, hasta el momento de iniciarse el ciclo de erosión y no existen relaciones constantes y definidas entre las variables dependientes e independientes, cuando ellas cambian respecto al tiempo; siendo éste, el relieve original, la geología, y el paleoclima las variables independientes. La Paleohidrología, es un reflejo de como fué la

influencia del paleoclima y la configuración del relieve de entonces, y por lo tanto se considera como una variable dependiente. El relieve y la morfología de los valles actuales, muestran la influencia de la paleohidrología y el paleoclima, así que ellas pueden catalogarse también como dependientes. Las variables restantes tienen poca significancia cuando se considera el período de tiempo geológico, aunque rasgos morfológicos de canales (Paleocanales) y formas de vegetación (fósiles) se preserven para estudios con otros propósitos.

En la escala de tiempo gradado ya puede visualizarse un continuo y progresivo ajuste entre los elementos del sistema, donde los mecanismos de auto-regulación (Feed-back) determinan condiciones de cuasi-equilibrio. En este caso, el tiempo ha perdido la relevancia que poseía en el caso del tiempo geológico, al igual que el relieve original, mientras que son las estructuras formales actuales, las de mayor importancia; la geología se conserva como independiente por ser condicionante del carácter y tipo de suministro sólido a los canales, la paleohidrología y paleoclima carecen de significancia sobre las formas actuales de los canales, pero se han mantenido como independientes debido a que en cierta forma, ellos determinan las estructuras y el relieve de los valles a través de los cuales se desarrollan los sistemas fluviales actuales. En este estado, no se puede definir la importancia de los eventos hidrológicos ^{no} erosionales, por lo cual estas se mantienen como indeterminadas.

Durante la escala de tiempo permanente que puede referirse a ho-

ras o días, variables que eran independientes dentro del tiempo geológico, pasan a ser dependientes en esta nueva condición; en la cual las variables tanto geométricas como hidráulicas no cambian con el tiempo y las magnitudes del transporte sólido o el caudal en una sección dada, pueden ser medidas, dejando de ser indeterminados como lo fueron en otros estados, para convertirse en dependientes.

Es durante estos lapsos de tiempo, cuando eventos significantes pueden alterar el sistema, desarticulando el equilibrio entre las variables operantes y un cambio de poca magnitud en una variable independiente, puede amplificarse a través de los parámetros de interconexión con otras, que pueden causar grandes cambios y transformaciones del sistema.

El caso de la reducción artificial del transporte sólido en un canal, cuando se construye un embalse y los casos confirmados de degradación general del lecho del cauce aguas abajo en los canales, es un ejemplo que ilustra este comportamiento. Del mismo modo, es de destacarse las fallas operacionales y de funcionalidad en obras hidráulicas, donde los efectos de diversas variables no reproducibles experimentalmente, operaron en el prototipo dentro de escalas de tiempo, que tampoco fueron consideradas al hacerse calibraciones circunscritas a escalas de tiempo permanente; así en un sistema de flujo con contornos rígidos, los análisis dentro de escalas de tiempo permanentes son adecuadas; pero no así, cuando se consideran canales naturales por ejemplo, cuyo contorno varíen según la condición del flujo, debiendo tratarse de lograr conseguir en este caso, que el

equilibrio se logre dentro de escalas de tiempo gradado.

10.2 Variables Hidráulicas - Geométricas en los Canales

Siendo las variables hidrológicas e hidráulicas las más activamente ligadas a la morfología actual de los canales naturales, es de interés establecer relaciones cuantitativas que las ligen entre sí. Existen diversas expresiones basadas en mediciones, tanto en canales de laboratorio como naturales con diversas características en sus configuraciones geométricas y climatológicas. La Tabla N° 3 es un resumen de algunas de las expresiones de esta naturaleza.

Una forma simple de relacionar el transporte sólido con el caudal líquido ha sido dada por Lane (1) usando como variables de interrelación la pendiente hidráulica y el diámetro medio del material del lecho en un canal, esta tiene la forma:

$$QS \propto Q_s d_{50} \dots\dots\dots (48)$$

La cual muestra, que un incremento ó reducción en el caudal líquido acompañado de variaciones en la granulometría del sedimento, debe producir cambios en las relaciones pendientes hidráulica-transporte sólido en secciones de un canal, tal que se mantenga el equilibrio definido por la relación (48).

Leopold y Maddock para definir las relaciones entre la geometría de las secciones y el caudal sólido-líquido, han propuesto las ecuaciones del tipo régimen en canales aluviales, que son de las formas:

* Tabla N° 3

$$b = K_1 Q^{a_o} ; d = K_2 Q^{b_o} ; \bar{A} = bd = K_3 Q^{a_o + b_o} ; V = K_4 Q^{c_o} \dots\dots\dots (49)$$

deduciéndose de la ecuación de continuidad que:

$$K_1 * K_2 * K_4 = 1.0 \dots\dots\dots (50)$$

$$a_o + b_o + c_o = 1.0 \dots\dots\dots (51)$$

y en adición para la relación caudal sólido-líquido:

$$Q_s = K_5 Q^\eta \dots\dots\dots (52)$$

valores promedios de los coeficientes calculados en ríos de USA indican las siguientes magnitudes:

$$a_o = 0.14 ; b_o = 0.50 ; c_o = 0.34 ; 3.0 > \eta > 2.0 \dots\dots\dots (53)$$

En algunos ríos del frente de montañas de la Cordillera de la Costa (Cura, Memo, Taguay y Tinapuy):

$$a_o = 0.12 ; b_o = 0.32 ; c_o = 0.58 \dots\dots\dots (54)$$

Un análisis de diversas variables consideradas en la Tabla N° 3 llevó a Schumm a dar, para las variaciones del caudal líquido y sólido en un tramo de un canal, las siguientes expresiones:

$$Q \propto \frac{b, d, \lambda}{S} \dots\dots\dots (55)$$

$$Q_s \propto \frac{b, \lambda, S}{d, P} \dots\dots\dots (56)$$

TABLA N° 3

ALGUNAS RELACIONES HIDRAULICO-GEOMETRICAS EN SECCIONES DE
CANALES NATURALES

(1) N°	(2) Rel. Analítica	(3) Autor	(4) Fecha	(5) Comentarios
1	$Q_s d_{50} \propto Q_s$	Lane	1955	Ecuación empírica. No confirmada por mediciones de campo.
2	$b = K Q_m^{0.5}$ $d = K Q^{-0.4}$	Leliansky Leopold-Maddock	1953-1954	Verificadas en ríos de USA (Kansas).
3	$F = 225 M^{-1.08}$ $M = 55 Q_s^{-1}$ $b = 2.3 Q_m^{0.38} M^{-0.39}$ $d = 0.6 M^{0.34} Q_m^{0.29}$	Schumm	1968-1969	Basadas en mediciones en secciones de 36 canales de lecho arenoso (10% grava). en great plains (USA) y regiones subhúmedas a semiáridas de Australia. Deducidas en canales donde la variación en la sección era determinada básicamente por las descargas.
4	$F = 56 Q_m^{0.10} M^{0.74}$	Schumm	1969	Ecuación que muestra alta correlación ($r = 0.93$), cuando se considera el tipo de sedimento (M)
5	$S = 1.8 d_{50}^{0.6} A^{-1}$	Hack	1957	Basada en mediciones de ríos de Virginia y Maryland (USA).
6	$S = 0.034 L^{-0.81}$	Hack Brush	1957	Deducida en lechos lutíticos
7	$S = 0.019 L^{-0.71}$	Brush	1961	Deducida en lechos de calizas
8	$S = 0.46 L^{-0.71}$	Brush	1961	Deducida en lechos de areniscas
9	$\lambda = 30 Q_m^{0.5}$	Dury	1965	-
10	$\lambda = 1890 Q_m^{0.34} M^{-0.74}$	Schumm	1971	-
11	$\lambda = 6,6 b^{0.99}$ $A = 10.9 b^{1.04}$	Inglis Ferguson	1949	Deducidas de mediciones en canales de laboratorio como naturales.
12	$\lambda = 10.9 b^{1.01}$ $A = 2.7 b^{1.1}$	Leopold-Maddock	1960	Mediciones de campo y laboratorio.

De las cuales puede inferirse para la concentración del sedimento:

$$C_m \propto \left(\frac{d}{S} \right)^2 P \dots\dots\dots (57)$$

Se han usado estas expresiones para analizar en que forma se interrelacionan las variables en ellas involucradas, cuando se produce un cambio natural ó artificialmente controlado del transporte sólido y líquido en un canal. Siguiendo al Profesor Schumm, se usará un signo (+) ó (-) para indicar incrementos ó reducciones en las variables involucradas, lo grándose obtener las siguientes formas compuestas:

$$Q^+ \propto b^+, d^+, \lambda^+, S^- \dots\dots\dots (58)$$

$$Q^- \propto b^-, d^-, \lambda^-, S^+ \dots\dots\dots (59)$$

$$Q_s^+ \propto b^+, \lambda^+, S^+, d^-, P^- \dots\dots\dots (60)$$

$$Q_s^- \propto b^-, \lambda^-, S^-, d^+, P^+ \dots\dots\dots (61)$$

Un incremento ó reducción de la descarga líquida, solamente puede ser el resultado de practicar derivaciones de flujos desde fuentes superficia-les hacia ó desde el sistema fluvial, mientras que un incremento del transporte sólido puede originarse de una aceleración de la erosión en los suelos de las cuencas, inducidas bien sea por una mayor actividad humana, urbanismo, desforestaciones intensivas ó tratamientos y manejo de la tierra para fines agrícolas. Debe destacarse sin embargo, que es muy improbable que en la naturaleza ocurran variaciones de una de estas variables

sin involucrarse a otras. Es muy lógico, que un incremento del caudal líquido, esté acompañado de una mayor producción y transporte de sedimentos, así cuando se derivan descargas líquidas desde un río con elevadas concentraciones de sedimentos hacia un canal de riego con una baja rata de transporte, puede establecerse para una sección sobre el último usando (58) y (60):

$$Q^+ Q_s^+ \propto b^+, d^+, \lambda^+, S^+, P^-, F^+ \dots\dots\dots (62)$$

En la cual se ha considerado -F- (ecuación (3) Tabla 3) relación ancho/ profundidad del canal -, para hacer dependiente a la magnitud del transporte sólido, del tipo de sedimento.

La expresión (62) señala que un aumento tanto del caudal sólido como líquido debe ir acompañado de un aumento en el ancho del canal, en la longitud de los lazos de meandros y la relación ancho/ profundidad -F- (b/d), mientras que la profundidad, la pendiente y sinuosidad del canal deben disminuir ó incrementarse en dirección aguas abajo.

Los efectos resultantes de la construcción de un embalse en un tramo del cauce, puede interpretarse como una situación que refleja el caso contrario de (62):

$$Q^- Q_s^- \propto b^-, d^\pm, \lambda^-, S^\pm, P^+, F^+ \dots\dots\dots (63)$$

y cuando los cambios de Q y Q_s son en sentidos opuestos como es también muy frecuente de ocurrir en la naturaleza, entonces:

$$Q^+ Q_s^- \propto b^+, d^+, \lambda^+, S^-, P^+, F^- \dots\dots\dots (64)$$

$$Q^- Q_s^+ \propto b^+, d^-, \lambda^+, S^+, P^-, F^+ \dots\dots\dots (65)$$

Que pueden reflejar bien sea: un control de la esorrentía en el canal con la construcción de un embalse con derivación de flujos limpios ó la condición de un canal colector dentro de un sistema de riego en el cual, se reduce el caudal debido al uso del agua, pero se incrementa la carga sólida debido al tratamiento de la tierra. En estos casos, es inmediato inferir cual es el sentido en el cual una u otra variable, puede experimentar cambios y que efectos podrían operar dentro del sistema, en términos de tales variaciones.

11. CONCLUSIONES

Existen notables diferencias entre los sistemas idealizados y los naturales, considerándose a los fluviales como un ejemplo típico de estos últimos. La complejidad en el desarrollo, evolución y formas resultantes de ellos, se deriva de la multiplicidad de variables operando a la vez, bajo distintos ambientes geológicos - climáticos y bajo diferentes escalas de tiempo. Sin embargo, se ha reconocido que los procesos que controlan sus comportamientos formales, pueden ser analizados mediante modelos teóricos fundamentados en leyes probabilísticas y la topología. Ello suministra un íntimo enlace entre la geomorfología - rama geológica que estudia las formas terrestres y sus procesos evolutivos - y otras ciencias ingenieriles, lo cual es útil para hacer enfoques mas analíticos y objetivos

sobre el comportamiento de estos sistemas, y que llevará a finalmente comprender, muchos fenómenos - no bien clarificados actualmente -, cuyo mejor conocimiento es necesario en estudios y prácticas de diseño especialmente en los campos geológicos, hidrológicos e hidráulicos. Las formas geomórfico-fluviales ocurren en la naturaleza a diferentes escalas geométricas y con distintos grados de similitud, siendo indispensable estudiar y analizar con más detalle, tanto a macro como a microescala en el campo y los laboratorios, cual es la importancia y relevancia de las variables involucradas en las transformaciones y respuestas finales de estos sistemas. Los modelos estadísticos ofrecen limitaciones para su aplicabilidad al análisis de patrones de altos ordenes; en adición y afortunadamente; la investigación y futura comprensión de muchos procesos que determinan el comportamiento de un sistema fluvial, puede hacer uso de analogías con procesos observados en otros mecanismos ó sistemas (biológicos, químicos, termodinámicos). El uso del principio de acción Hamiltoniano (Din. Lagrange: principio del trabajo mínimo) aplicable en diversas ramas científicas, para explicar el comportamiento del perfil longitudinal de un canal, es un ejemplo de ello.

El empleo de tales métodos no deben de otra parte, restar importancia y aislarse de aquellas interpretaciones basadas en el análisis del medio natural, haciendo uso de las herramientas que suministran las ciencias naturales; en este sentido la mayor compenetración de materias como la hidráulica, hidrología, geomorfología y otras, será de gran utilidad para mejorar el conocimiento de la naturaleza y particularmente el de los sistemas geomórfico-fluviales.

12. DEFINICION DE TERMINOS

Los términos no definidos en el cuerpo del informe se deben interpretar así:

- A Area de drenaje de la cuenca
- $\bar{A}$ Area de la sección recta de un canal
- A_u Area de una cuenca de orden u , añadir r para obtener la de orden $(u + r)$.
- α Orden de una cuenca según la jerarquía de las corrientes.
- α_o Pendiente de la recta que relaciona la profundidad con el caudal en una sección (escala logarítmica)
- b Ancho medio de la sección transversal recta de una canal
- b_o Pendiente de la recta que relaciona el ancho medio de una sección con el caudal (escala logarítmica).
- C_m Concentración media del sedimento en un tramo del canal.
- c_o Pendiente media de la recta que relaciona el área en una sección de un canal con el caudal (esc. logarítmica).
- D Densidad de drenaje
- D_o Diámetro de un círculo que tiene el área equivalente al de la cuenca.
- d Profundidad media de una sección en un canal
- d_{50} Diámetro medio de las partículas del material de lecho
- $\partial h / \partial x, \partial h_s / \partial x$ - gradientes del flujo superficial y subsuperficial.
- F Relación ancho/profundidad en una sección de un canal.
- H Relieve de la cuenca, altura referida a un nivel de base
- $K, K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$ - Parámetros de proporcionalidad en ecuaciones exponenciales que relacionan variables hidráulico-geométricas en una sección de un canal.

L	Una longitud genérica de la cuenca ó del cauce principal.
L_M	Longitud media del drenaje superficial.
L_1	Una longitud del drenaje superficial, que condiciona la densidad del <u>dre</u> naje en cuencas con similitud geométrica.
L_p	Longitudes medias de canales de órdenes dados, en una red de drenaje
m	Factor de proporcionalidad de áreas con cierta similitud geométrica.
n	Número total de canales existentes en una red finita
n_f	Número total de nodos fuentes en una red de drenaje.
N	Número de nodos internos mas uno (la raíz) en una red de drenaje
P	Sinuosidad del canal.
Q	Caudal instantáneo en una sección de un canal
Q_m	Caudal medio anual de un canal en una sección
Q_S	Transporte sólido a través de un canal
Ra	Razón de las áreas medias de cuencas con órdenes (u + r) a las de orden (u).
$\bar{R}_b$	Radio medio de bifurcación.
Rs	Razón de las pendientes medias en canales de órdenes (u + r) a las de ca- nales de orden u.
Re	Razón media de las longitudes de canales de orden (u + r) a las de orden (u).
S	Pendiente hidráulica de un flujo en un tramo del canal
$\bar{S}_u$	Pendiente media de un canal de orden especificado. Al añadir r , se ob tiene el valor correspondiente a otro de orden (u + r)
Sc	Pendiente media en un tramo del canal.
Ss	Pendiente media de las vertientes del valle ó de la planicie fluvial en un sentido normal al canal.

- S (y) Error Standard. Una medida del grado de correlación de dos variables.
- Se Factor de proporcionalidad entre las longitudes de cuencas geométricamente similares.
- t Número total de bifurcaciones en una red finita.
- tb Factor de proporcionalidad entre los anchos de cuencas geométricamente similares.
- λ Longitud de onda de un lazo de meandro.
- ϵ Exponente que relaciona al gradiente medio del perfil longitudinal de un canal, con el área acumulada de la cuenca en cada tramo. (Esc. logarítmico).

13. BIBLIOGRAFIA

1. Eagleson. Dinamic Hidrology. Chap 16. the catchment.
2. Horton R.E. Erosional Development of streams and their drainage Basins. Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology Bull. geol. Soc. Am. Vol. 56 pág. 275 - 370. 1945
3. Leopold L. , Wolman G. , Miller J. - Fluvial Processes in Geomorphology Freiman ed. 1964.
4. Mock. S.J.- A clasification of channel links in streams networks. Vol. 7. N° 4. Dic. 1971.
5. Pérez H. David.- Procesos fluviales en la cuenca y sistema deltaico del río Neverí Vla. Oriental. Div. Hidrología, MOP 1975.
6. Pérez H. David.- Geomorfología, erosión y transporte de sedimentos en áreas meridionales de la cordillera de la costa, Div. Hidrología MOP 1972.
7. Rzhantitsyn. N. - Morfohological and hidrological regularities of the structure of the river net " Gidrometeoizdat Len. 1960 (English Trans).
8. Shreve R. statistical law of stream numbers J. Geol. Vo. 74 N° 1, pag. 17-37 - 1966.
9. Strahler A. quantitative analysis of watershed geomorphology. Trans. Agu. Vol. 38 pp. 913-920. 1957.
10. Schumm S.A. channel adjustament and river metamorphosis. river mechanics Vol. 1 chap. 5. page 51-5-23 1971.
11. Schumm S.A. fluvial geomorphology: the historial perspective, river mechanics Vol. 1 chapt 4. 1971. Fort Collins Col. USA.
12. Woodyer K. Brookfield M. the land system and its stream net. A morphometric study of the land systems in semi-arid central. Australia C.S.I.R.O. Div. land Res. tech. mem. 66/5 Camberra 1966.

Continuación Gráficos:

	Nº
ANALISIS DE HORTON. CORRELACION DEL ORDEN DE LOS CURSOS CON LAS LONGITUDES Y NUMERO DE CANALES. CUENCA TINAPUY	13
PATRONES DE MEANDROS EN EL RIO NEVERI. TRAMO INFERIOR	14

FIGURAS

PERFIL LONGITUDINAL Y CON CAVIDAD DE UN CANAL	A
UNA RED DE DRENAJE FINITA CON SUS ELEMENTOS PRINCIPALES	
FORMA GEOMETRICAS SIMPLES DE CUENCAS HIPOTETICAS	C
AREAS NO DIRECTAMENTE DRENADAS POR CANALES DE ESCORRENTIA EN UNA CUENCA HIPOTETICA	D
DEFINICION DE LAS PARTES DE UN MEANDRO	E
CAMBIOS DE UNA VARIABLE GEOMORFICA SEGUN LAS ESCALAS DE TIEMPO	F

MAPAS

CUENCA DEL RIO UNARE. HIDROGRAFIA Y PATRONES DE DRENAJE	1
CONFORMACION DEL CANAL Y ESTRUCTURAS EN LA PLANICIE FLU- VIAL DEL RIO ORINOCO EN EL TRAMO CONFLUENCIA RIO CAURA- MARIPA.	2

TABLAS

	Nº
DISTRIBUCION PROBABILISTICA DE PATRONES TOPOLOGICAMENTE DIFERENTES CON ORDENES HASTA 7	1
SIGNIFICANCIA DE LAS VARIABLES GEOMORFICOS-FLUVIALES SEGUN LAS ESCALAS DE TIEMPO.	2
ALGUNAS RELACIONES HIDRAULICO-GEOMETRICAS EN SECCIONES DE CANALES NATURALES	3

GRAFICOS

PERFIL DE LA CUENCA Y DIVISION DEL DRENAJE SUPERFICIAL Y SUB-SUPERFICIAL	1
CURVAS HIPSOMETRICAS Y SECCIONES HIPOTETICAS TRIDIMENSIONALES DE UNA CUENCA HIDROGRAFICA	2
RELACION ENTRE LAS PENDIENTES DE LOS VALLES Y DE LOS CANALES	3
RELACION ENTRE LAS AREAS DRENADAS Y LA VARIACION DEL GRADIENTE MEDIO DEL PERFIL LONGITUDINAL DEL CAUCE. CUENCA DEL NEVERI	5
RELACION ENTRE LAS PENDIENTES DE LOS CANALES Y VALLES ALUVIONALES	4
HIDROGRAFIA DE LAS SUBCUENCAS LAYA Y PESCADO. PERFILES LONGITUDINALES.	6
DISTRIBUCION DE LAS AREAS DE ACUERDO A LA VARIACION ALTITUDINAL. CUENCA DEL RIO NEVERI	7
CONFIGURACION MORFOLOGICA DE DIFERENTES PATRONES FLUVIALES DE DRENAJE	8
RELACION ENTRE LAS LONGITUDES DE LOS CANALES Y AREAS DRENADAS	9
ORDEN DE LOS CANALES Y PORCENTAJE DE LAS AREAS DRENADAS RIOS CURA Y TAGUAY. CORDILLERA DE LA COSTA-VLA.	10
SIMILITUD EN CUENCAS RECTANGULARES INTERNAS DE UNA RED	11
RAZON DE AREAS MEDIAS DE CUENCAS Y LONGITUDES MEDIAS	12