

Hid 77

INSTITUTO AGRARIO NACIONAL
GERENCIA DE TIERRAS
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS Y CATASTRO
SECCION DE GEOLOGIA E HIDROLOGIA

CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE UBICACION DE -
CUENCAS REPRESENTATIVAS EN REGIONES HIDRO
LOGICAS HOMOGENEAS. - *

Por:
Pierre Dubreuil

* Publicación miscelanea N° 6
del Departamento de Estudios
y Catastro.-

INSTITUTO AGRARIO NACIONAL
GERENCIA DE TIERRAS
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS Y CATASTRO
SECCION DE GEOLOGIA E HIDROLOGIA

CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE UBICACION DE CUENCAS
REPRESENTATIVAS EN REGIONES HIDROLOGICAS HOMO -
GENEAS.-

Por: Pierre Dubreuil **

Traducido del Francés y adaptado
al Español por:
Luís Alberto Villamizar
Sala de Hidrología

** Director de Investigaciones del Servicio Hidrológico
del O.R.S.T.O.M., París. Francia

Caracas Septiembre de 1.973

ABSTRACT

In the intertropical zones the hidrological data often are -- scarce and incomplete. To improve the collection of these da- ta from the basic network, the use of representative basins is very much recommended, their rational implantation has to make these basins representative of areas as large as possible.-

By consideration of the quantitative physical and climatologi- cal factors which have influence upon the hidrological charac- teristics, this paper proposes a simple method to determine ho- mogeneous hidrological zones using successively the folowing - factors: rain, permeability, land slope and vegetal cover, - which are generally known with a sufficient accuracy.-

The rational implantation of representative basins may be easy if it is based upon the homogeneous zones was determined.-

RESUMEN

En las zonas intertropicales los datos hidrológicos son generalmente raros e incompletos. Para perfeccionar la colección de estos datos a partir de las redes básicas, es recomendable el uso de cuencas representativas y su ubicación racional en áreas tan grandes como sea posible.-

Tomando en cuenta los factores físicos y climatológicos que tienen influencia sobre las características hidrológicas, este trabajo propone un método simple para determinar zonas hidrológicas homogéneas usando sucesivamente los siguientes factores: lluvia, permeabilidad, pendiente y cobertura vegetal, los cuales generalmente son conocidos con bastante precisión.-

La ubicación racional de cuencas representativas puede ser fácil si se basa en las zonas homogéneas ya determinadas.-

CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE UBICACION DE CUENCAS
REPRESENTATIVAS EN REGIONES HIDROLOGICAS HOMOGE-
NEAS.-

INTRODUCCION.-

Mediante los limnógrafos de la red hidrométrica y los pluviómetros de la red meteorológica, el Hidrólogo dispone de su principal herramienta mediante la cual puede resolver la mayoría de los problemas del escurrimiento de las aguas. Ahora bien para cuencas con áreas menores a una superficie dada éste procedimiento no es aplicable.-

Esta superficie standard varía de una región a otra, generalmente es superior a la densidad óptima recomendada para las redes hidrométricas, que sobrepasan los Setecientos Kilometros Cuadrados (.. 700 Kms²) (superficie controlada por una estación) para las regiones templadas industrializadas, los Dos Mil Quinientos Kilometros Cuadrados (2.500 Kms²) para las regiones intertropicales, los Ocho Mil Kilometros Cuadrados (8.000 Kms²) y aún más para las regiones áridas, polares y poco pobladas. A excepción de ciertas zonas de fuerte precipitación (montañas de regiones templadas, Islas del Caribe, etc) donde la densidad aconsejable disminuye a Ciento Cuarenta Kilometros Cuadrados (140 Kms²), se puede decir que la red hidrométrica controla solamente superficies mayores de Un

Mil Kilometros Cuadrados (1.000 Kms^2).-

Para superficies más pequeñas el Hidrólogo ha inventado un nuevo y complejo mecanismo, la cuenca vertiente representativa ó experimental que agrupa en una área determinada los instrumentos primarios escalas limnimétricas y pluviómetros.-

No se trata pues de un instrumento puntual diseminado con cierta densidad para cubrir una región, sino de un conjunto de cierta extensión. A partir del momento cuando un instrumento forma parte de éste conjunto, no hay ninguna razón para considerar este factor como fijo y de concebir mecanismos de terminada superficie, por ejemplo cuencas de Veinticinco Kilometros Cuadrados (25 Kms^2). Por el contrario hay gran interés en estudiar este factor espacio mediante el nuevo mecanismo y más aún cuando la mayoría de los caracteres cuantitativos del escurrimiento presentan una variabilidad en el cual el factor espacio toma un lugar preponderante.-

De tal manera que el rango de utilización de la cuenca vertiente representativa puede estar prácticamente entre varias decenas a varias-centenas de Kms^2 , (más pequeña se convertirá en parcela experimental y más grande sería muy difícil de controlarla). En éste orden de magnitudes es seguro que se empleará con más frecuencia la cuenca de dimensiones más aproximadas por defecto a aquellas que cubren una precipitación simple.-

Para muchos climas templados ó intertropicales lo más conveniente sería Veinticinco Kilometros Cuadrados (25 Km^2).

DIVERSOS TIPOS DE ESTUDIOS EN CUENCAS PEQUEÑAS.

Confeccionada en diversas partes del mundo por Hidrólogos que se enfrentan con problemas a menudo diferentes, la cuenca vertiente representativa ó experimental ha evolucionado en muchos sentidos y bajo ésta concepción, hoy día se pueden todavía reunir muchos instrumentos cuyo principio de fabricación permanece igual pero la forma, la estructura y el empleo son bastante diferentes.

Sin embargo es posible ordenarlas en tres grandes clases:

- 1).- Las cuencas vertientes representativas de investigación fundamental en las cuales el Ciclo Hidrológico se descompone en sus múltiples componentes (la totalidad ó ciertos de ellos) que son objeto de un análisis detallado con la ayuda de numerosos y costosos instrumentos.
- 2).- Las cuencas vertientes de carácter estrictamente experimental en las cuales uno de los factores del complejo físico (la mayoría de las veces la vegetación) es modificado artificialmente por acción humana, y donde la influencia de ésta experiencia sobre el ciclo hidrológico es objeto de un análisis detallado por comparación con una cuenca testigo.

3).- La hoya vertiente representativa práctica que nos permite en tiempo récord obtener datos cuantitativos acerca del régimen hidrológico de una corriente ó de una región desconocida con fines de elaboración de un proyecto de desarrollo hidráulico.-

Las dos primeras clases exigen conocimientos relativamente importantes y no son generalmente conocidas (además en pequeña cantidad) que en países de desarrollo económico avanzado y que en razón de ésto tienen dificultades específicas de aprovisionamiento de agua, estos dos tipos de cuencas son casi permanentes ó al menos funcionan durante cinco (5) ó diez (10) años.-

Por el contrario, la cuenca práctica es la consecuencia de países en vías de desarrollo ó poco poblados, en los cuales los conocimientos hidrológicos son muy rudimentarios y permite obtener una respuesta rápida en dos (2) ó tres (3) años a las múltiples interrogantes de los responsables del desarrollo económico.-

Es conveniente hacer aquí un pequeño aparte sobre la terminología. La expresión utilizada generalmente en Francés:

"Cuenca Vertiente Experimental", no es válida según opinión de ciertos críticos, a menos que se proceda verdaderamente

ramente a efectuar experimentos sobre el medio físico natural, es decir en un caso sobre tres según nuestra clasificación .-

En los otros dos (2) casos, no se modifica el equilibrio natural, sin embargo se puede considerar que éstas dos clases de cuencas - lo representan simplemente.-

Bajo éste punto de vista los esfuerzos de homologación de terminologías emprendidos actualmente nos llevan a utilizar sólo dos (2) grupos:

- a.- Las cuencas experimentales, correspondientes a la Segunda Clase.-
- b.- Las cuencas representativas, correspondientes a las clases Primera y Tercera, la separación de éstas dos es muy imprecisa.-

Sin embargo podemos conservar temporalmente si es necesario los complementos "de investigación" y "de orientación práctica" para distinguir los dos sub-grupos de las cuencas representativas.-

Aunque poco frecuentes hasta ahora, no podemos pasar por alto un último grupo de cuencas que podrían ser también representativas no solamente del equilibrio natural del medio físico bajo la influencia del hombre, sino también del mismo medio protegido del hombre. Se ha convenido en emplear la expresión "cuencas - señales" para designarlas.-

Aunque los fines y a menudo los medios, difieren entre un grupo y otro de cuencas vertientes, para todos se debe medir las manifestaciones principales del ciclo del agua: la lluvia, el escu -

rrimiento en los ríos, los movimientos de la capa freática y esto se efectúa mediante aparatos similares y según una metodología bastante constante.-

La particularidad de las cuencas de investigación ó de experimentación está en el hecho de que a las mediciones generales y clásicas debemos agregar otras de carácter específico en cada caso, por lo tanto la metodología debe adaptarse continuamente.-

Se ve claramente que las mediciones principales a que hemos hecho referencia representan la mayoría ya absoluta, ya relativa de los trabajos de campo y que es deseable se efectúen según una metodología lo más homogénea posible en todas partes y que éstas reglas abarquen también a la recolección, a la clasificación y al procesamiento de los datos obtenidos por esas mediciones. Tenemos la intención de dar nuestra contribución al establecimiento de esta metodología de recolección, clasificación y de procesamiento de datos obtenidos en los campos climatológicos, pluviométricos e hidrométricos de superficie dedicandonos particularmente al caso de la cuenca vertiente representativa a orientación práctica. Pero sobre todo nos parece esencial examinar las alternativas de ubicación de una cuenca de estudios para que sea representativa de una región homogénea.-

LAS ALTERNATIVAS DE LA UBICACION DE UNA CUENCA REPRESENTATIVA O EXPERIMENTAL. -

Esta ubicación puede ser determinada por la localización de la futura zona a arreglar para la cual es necesario el estudio de cuenca pequeña, es el caso casi general para los arreglos de la capa vegetal (cuenca de carácter estrictamente experimental), es también mayormente el de cuencas representativas a orientación práctica. En éstas condiciones los límites de selección son muy restringidos.-

Es el caso netamente contrario cuando la ubicación es libre ó al menos sujeta a una característica regional, es generalmente el caso de cuencas de investigación, también algunas veces de cuencas representativas a orientación práctica cuando vienen a completar la red hidrométrica en la investigación de datos hidrológicos regionales de base.-

Esta libertad de ubicación hace la selección más difícil ya que el criterio de validez será el de ser representativa dentro de una región geográficamente homogénea. Ahora bien, si cualitativamente los factores físico-climáticos de una región son bastante conocidos de antemano, será totalmente contrario cuando se les quiere estimar cuantitativamente para verificar la homogeneidad ya que justamente los estudios proyectados tendrán por finalidad hacer resaltar las relaciones cuantitativas entre dichos facto -

res y los caracteres del régimen hidrológico regional.-

Para obviar la indecisión, es importante definir la región geográficamente homogénea ordenando los factores físico-climáticos por orden decreciente según su importancia, despreciando los factores secundarios.-

De ésta manera se puede adoptar el esquema de clasificación siguiente:

- a).- El clima determina la región.
- b).- Las divisiones regionales (sub-regiones ó zonas) dependen sucesivamente de las características del suelo y del subsuelo (noción de permeabilidad), del relieve (noción de índice de pendiente) y de la capa vegetal.-

El clima interviene generalmente (y muy particularmente en zona intertropical) en el balance hidrológico esencialmente por medio de las precipitaciones (altura anual, irregularidad inter anual, distribución mensual, tipos de aguacero, alturas de precipitaciones excepcionales, intensidades-duración-área de los aguaceros, etc) en segundo término por medio de las temperaturas (media anual, variación mensual, máxima, mínima y desviaciones, etc.) y de una manera accesoria por medio del régimen de los vientos y el grado de humedad. Una buena representación del clima puede ser dada por uno de los índices clásicos (W. Koppen, Thornthwaite ó Turc).-

Estos últimos que se abocan a despejar la evapotranspiración, parecen más interesantes para el Hidrólogo. Aunque sería peligroso utilizar estos índices para determinar con precisión el valor real de la evapotranspiración de una región cualquiera del globo, se debe reconocer que ellos representan con bastante exactitud el clima y se puede decir que regiones vecinas con índices iguales tendrán seguramente el mismo clima, por lo tanto se tratará de regiones homogéneas.-

Es evidente que los fines perseguidos en los estudios de cuencas pequeñas pueden influir sobre la escogencia del índice a tomar en consideración, sin excluir otros factores selectivos, para discriminar las regiones homogéneas. Tomando en cuenta la variedad de climas y la multiplicidad de clasificaciones, no será competencia del Hidrólogo de agregar otras divisiones.-

Es nuestro criterio que la selección de la ubicación de cuencas representativas se debe hacer según reglas que se definirán dentro de regiones climáticas homogéneas. Si por ejemplo determinadas consideraciones de programación imponen un estudio general de una cuenca muy extensa para que no sea evidente la homogeneidad del clima, se tratará de reducir al mínimo el número de regiones homogéneas diferentes bajo el punto de vista climático para no extender al extremo el análisis, ni hacer muy complejas las síntesis finales.-

Por orden de importancia, las características del suelo y del sub-suelo, se imponen en el primer plano de división de regiones climáticamente homogéneas. Esta división parece cumplirse según el criterio de la permeabilidad del suelo y del sub-suelo a fin de separar zonas con predominio impermeable ó predominio permeable, esto permite, en efecto separar las zonas donde la mayoría de las corrientes son superficiales de aquellas donde existe una mesa freática que participa cuantitativamente en el ciclo del agua (sea que su alimentación dependa esencialmente de las precipitaciones locales en la zona adyacente ó que su drenaje se efectúe dentro de la red hidrográfica local), los estudios a realizar y los medios a desarrollar son bastante diferentes en los dos casos.-

La llave de la división reside entonces en la existencia ó ausencia de un sub-suelo permeable, la permeabilidad del suelo interviene generalmente de forma secundaria y un factor variable determinante será la mayor ó menor potencialidad de escorrentía (ó de infiltración) de dicho suelo. En efecto bajo el ángulo de la permeabilidad, suelo y sub-suelo se relacionan, pero quizás no de una manera tan estrecha como se podría suponer, las condiciones de pedogenesis pueden muy bien modificar, seguramente invertir relativamente la mayor ó menor permeabilidad de un suelo con respecto al sub-suelo.-

En el plan cuantitativo, se encuentra la dificultad de la separación entre esos dos tipos de zonas entre las cuales no existe una frontera precisa.-

Si la capa acuifera es drenada por la red hidrográfica local, se podrá tomar como límite un cierto porcentaje del escurrimiento - total medio anual dado por el drenaje (posiblemente 40% para el límite inferior de la zona permeable y 10% para el límite superior de aquella mayormente impermeable.-

En la ausencia de drenaje local, será necesario llevar el criterio distintivo seleccionado sobre el valor de la permeabilidad - media de los terrenos (K) medida en condiciones bien determinadas (métodos de análisis Hidrodinámico de suelos en laboratorio - ó en el campo según Muntz ó Porchet por ejemplo). Se podrá admitir de ésta manera como zona permeable la que tenga permeabilidad (K) superior a 2.10^{-5} m/s ó sea 35 mm/h y como impermeable donde (K) es inferior a 4.10^{-6} ó sea 15 mm/h.-

En los dos casos la franja intermedia representa una zona sin predominio particular en materia de permeabilidad.-

Es evidente que la selección de límites cuantitativos es un poco arbitraria, hemos hablado sólo para mostrar las dificultades, - pues en la práctica no se tienen ni las informaciones (criterio - del porcentaje de escurrimiento), ni los medios de cálculo rápido (criterio de permeabilidad media) y la separación de las zonas se debe hacer cualitativamente. La selección es posiblemente más arbitraria ; pero es más rápida y más fácil para un especialista. El examen contemplará simplemente sobre la carta geológica, la - tendencia arcillosa de los suelos, la existencia de un curso de-

agua perenne en región de régimen estacionario de precipitaciones, etc.-

Se pueden proponer las normas siguientes de división:

- Zona impermeable: Sub-suelo prácticamente impermeable. $K < 4.10^{-6}$ m/s
Suelo arcilloso ó arcillo limoso (15 mm/h)
Ausencia de capa freática. Escurrimiento superficial dependiente sólo de las precipitaciones, presentando un agotamiento muy rápido en región a estación lluviosa marcada.
Escorrentía 90 % escurrimiento total.
- Zona medianamente permeable: Sub-suelo medianamente permeable. $2.10^{-5} < K < 4.10^{-6}$ m/s
Suelo limoso, limo arcilloso (15 a 35 mm/h) ó arcillo - arenoso.
Posibilidad de existencia de capa freática localizada y de poca importancia.
Escurrimiento superficial mantenido por un agotamiento a pequeños gastos.
Seguía posible en región a estación seca larga.
Escorrentía entre 90 y 60 % del escurrimiento total.
- Zona permeable: Sub-suelo permeable $K > 2.10^{-5}$ m/s
Suelos arenosos, areno-limosos. (35 mm/h) ó areno-arcillosos. Capa freática general. Escurrimiento permanente para año no anormalmente seco. Escorrentía inferior a 60 % del escurrimiento total.-

En segundo lugar, el criterio de sub-división regional debe buscarse en el relieve. Este es un factor de importancia capital sobre la mayor ó menor aptitud a la escorrentía de los terrenos, el puede modificar la repartición entre infiltración y escorrentía estimada bajo el simple aspecto de la permeabilidad: él es princi-

palmente un factor de repartición de las aguas de lluvia entre el escurrimiento y la evapotranspiración real. Su intervención se impone en la subdivisión de zonas homogéneas en sectores.- La escogencia del relieve debe ser en lo posible global, puede continuar cualitativa como para la permeabilidad, pero parece fácil de dar una visión cuantitativa sin tener que efectuar cálculos complejos cuando se trata de una región que tiene planos altimétricos. Bajo el ángulo de su influencia sobre el escurrimiento, el relieve presenta dos (2) direcciones privilegiadas, la de los Thalwegs y la de las vertientes perpendiculares a la anterior.-

Es fácil medir la pendiente longitudinal promedio de un curso de agua y no muy difícil pero sí delicado, estimar la pendiente transversal promedio de las vertientes. Se piensa que con esas dos (2) pendientes se tiene una apreciación completa y satisfactoria del relieve, es verosímil en el plan cualitativo. Sin embargo si se desea subdividir el relieve en diversas clases, es necesario formar un artificio que será plenamente satisfactorio cuando se asocian pendientes longitudinales y transversales. Pero, como se hace?. La solución simple, a priori, aunque no hemos podido verificar experimentalmente el valor, sería tomar el promedio de esas dos (2) pendientes. Es necesario asumir una distancia base a lo largo de la corriente (10, 20 ó 50 Km desde la fuente) para calcular la pendiente

longitudinal, si nó, ésta disminuirá y en consecuencia la pendiente promedio del terreno disminuirá (cualquiera que sea la forma de asociación entre pendientes longitudinales y transversales) sin que se suavise verdaderamente el relieve. La necesidad de ésta restricción limita la escogencia del relieve en ciertos sectores próximos a la divisoria de aguas, será necesario entonces empezar de nuevo para longitudes más largas de las corrientes.-

Pero en éstas condiciones, se puede escoger el estudio del relieve por cuencas vertientes, transformando la restricción lineal en una restricción de área, pues se tienen los medios para estimar correctamente la pendiente promedio de una cuenca tomando en cuenta la totalidad del relieve, con el índice de pendiente de M. Roche.-

Este índice está dado por:

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n X_i \sqrt{S_i (d_i - d_{i-1})}$$

donde:

X_i : distancia que separa dos curvas de nivel en el rectángulo equivalente.

d_i et d_{i-1} : las cotas de dos curvas de nivel vecinas.

s_i : el área total comprendida entre esas dos curvas

L : la longitud del rectángulo equivalente.

Además del trazado de las curvas de nivel (es necesario al menos tres para que el índice tenga cierta precisión), se debe delimitar

la cuenca, medir la superficie A, su perímetro P, su índice de compacidad $K = 0,28 \frac{P}{A}$ para calcular L, después medir las superficies comprendidas entre las diferentes curvas de nivel.- Este trabajo bastante fácil puede sin embargo ser considerado como demasiado largo para una prospección cartográfica general que no tenga por objeto sino diferenciar sectores con relieve homogéneo. Se puede simplificar esta labor calculando la pendiente promedio de una cuenca mediante la sig fórmula:

$$I = \frac{\Delta^D}{L}$$

cociente del desnivel de la cuenca por la longitud del rectángulo equivalente.-

Considerada como un poco rudimentaria, ésta pendiente promedio (para cuencas inferiores a 500 Kms², que son las que nos interesan) es al contrario muy aceptable.-

Hemos constatado para aproximadamente cuarenta (40) cuencas pequeñas de regiones áridas, intertropicales y templadas, que la pendiente promedio guarda una relación estrecha con el índice de pendiente según la progresión siguiente:

Pendiente Promedio (m/Km)	2	5	10	20	50	100	200
Indice de Pendiente	0,042	0,070	0,100	0,145	0,235	0,340	0,490

Nosotros aconsejamos de no calcular el desnivel Δ^D haciendo la diferencia entre la altitud en el punto más alto y la altitud a la salida de la cuenca, sino que para evitar errores creados-

por puntos parecidos, tomar en consideración puntos cuyos valores de altitud sean superiores ó inferiores un 5% de los valores en la superficie de la cuenca, su determinación se hace fácil y rápida.-

De ésta manera estando el relieve bién representado por la pendiente promedio de una cuenca vertiente, es necesario para establecer una clasificación, tomar como base una superficie dada, después buscar una ley de variación en función del área en estudio, vamos a suponer ésta área base igual a Veinticinco (25) kilómetros cuadrados.-

Proponemos una división arbitraria del relieve en seis (6) clases nominadas por un adjetivo calificativo y a cada una de éstas hacemos corresponder límites de validéz en pendiente promedio y en índice de pendiente.

1) Relieve muy suave	Pendiente promedio inferior a 5 m/Km	$I_p < 0.070$
2) Relieve suave	Pendiente promedio comprendida entre 5 y 10 m/Km	$0,070 < I_p < 0,10$
3) Relieve moderado	10 a 20 m/Km	$0,10 < I_p < 0,14$
4) Relieve bastante fuerte	20 a 50 m/Km	$0,14 < I_p < 0,23$
5) Relieve fuerte	Pendiente promedio entre 50 y 100 m/Km	$0,23 < I_p < 0,34$
6) Relieve muy fuerte	Pendiente promedio superior a 100 m/Km	$I_p > 0,34$

Si nos fijamos ahora a ambos lados de ésta área base de Veinticinco Kilometros Cuadrados (25 Kms^2), se constata generalmente que para cuencas muy pequeñas (incluidas dentro de la cuenca de 25 Kms^2), la pendiente promedio y el índice de pendiente son más elevados y que para cuencas muy grandes (incluida la cuenca de 25 Kms^2) la pendiente promedio y el índice de pendiente son más suaves y esto para una misma región que presenta un relieve homogéneo, en consecuencia una misma aptitud al escurrimiento.-

Para conservar la misma división en seis (6) clases de relieve, cualquiera que sea la superficie considerada, entre Cinco Kilometros Cuadrados (5 Kms^2) y Quinientos Kilometros Cuadrados (500 Kms^2) es necesario establecer un límite de variación de las pendientes medias y de los índices de pendiente.-

Hemos estudiado muy rápidamente estos problemas para varios grupos de cuencas y como se encuentra cierta dispersión según los modelos de una región a la otra, hemos seleccionado un límite promedio proveyendo los coeficientes K y K' por los cuales se deben multiplicar las pendientes medias y los índices de pendiente de las cuencas de Veinticinco Kilometros Cuadrados (25 Kms^2), supuestas iguales a la unidad, para obtener los valores que corresponderán a una nueva superficie.-

Superficie Km ²	Coeficiente K Pendiente Promedio	Coeficiente K' Indices de Pendiente
5	2	1,5
10	1,5	1,25
25	1	1
50	0,75	0,85
100	0,50	0,70
250	0,35	0,55
500	0,25	0,45

En la práctica, para saber en que clase colocar una cuenca de una superficie dada, se calculará su pendiente media, después aplicando el coeficiente $1/K$, se obtendrá la pendiente media de una cuenca de Veinticinco Kilometros Cuadrados (25 Kms²) similar en escurrimiento, que nos dará la clase buscada.-

Teniendo éste límite de variación una precisión muy reducida, sólo se efectuará un buen estudio de los relieves de una región climáticamente homogénea (ó de una de sus zonas homogéneas en permeabilidad) cuando se trabaja con cuencas de superficie aproximada a los Veinticinco Kilometros Cuadrados (25 Kms²) y procediendo a efectuar un sondeaje en diversos lugares de la región ó zona estudiada.-

La experiencia muestra que un trabajo sobre una base de Veinticinco Kilometros Cuadrados (25 Kms²) no es posible que a grande-escala cuando se quiere efectuar un estudio bien detallado de una región limitada.-

Pero cuando se trata de efectuar un estudio superficial de una gran región (varias decenas de millares de Kms² por ejemplo), es

evidente que la rapidez de ejecución ligada a las posibilidades cartográficas no puede ser obtenida que cuando escogemos una base de Quinientos Kilometros Cuadrados (500 Kms^2) (se trabaja con escalas de 1/200.000 ó 1/500.000).-

Como última información, señalaremos que la pendiente longitudinal promedio de las corrientes no es muy diferente de la pendiente promedio de las cuencas drenadas por esas corrientes, con una ligera tendencia a ser un poco inferiores. Pero no se puede tomar ésta pendiente longitudinal como representativa del relieve, pues es muy difícil apreciar la longitud real de un thalweg y su punto exacto de nacimiento en los mapas, por éste motivo los valores calculados presentan una dispersión notable en comparación con el índice de pendiente.-

La vegetación, es el último elemento del medio natural que tiene influencia en la determinación de regiones homogéneas desde el punto de vista hidrológico.-

Ante todo debemos notar que la escogencia del clima como primer factor de clasificación regional implica antes que todo tomar en consideración la vegetación natural. En efecto es evidente que a cada tipo de clima corresponde una clase de vegetación: Selva tropical, estepa herbosa, etc.-

La vegetación no puede entonces intervenir como elemento de diferenciación en lo que respecta a su aspecto botánico y natural pero si bajo su aspecto de cobertura del suelo considerando su ma-

yor ó menor degradación debida a la acción del hombre (explotación intensiva de maderas, tala y quema para cultivo).-

Se podría adoptar el esquema siguiente de clasificación de la vegetación por importancia decreciente según su papel de cobertura del suelo.-

- 1.- Selva natural protegida
- 2.- Selva explotada para la producción de madera presentando claros en pequeña cantidad.-
- 3.- Selva ó sabana arbolada densa deteriorada por el cultivo de islotes de cierta importancia.-
- 4.- Terrenos cultivados sea con existencia de islotes de Selva ó de sabana arbolada densa, ó totalmente, pero sobre los cuales los cultivos aseguran una buena cobertura del suelo en época lluviosa.-
- 5.- Terrenos cultivados sin protección eficaz del suelo en época lluviosa. Sabanas entre mezcladas de espinos.-
- 6.- Estepas herbosas naturales, prados artificiales permanentes.
- 7.- Terrenos incultos o abandonados después de erosión debida a los cultivos y cubiertos de una vegetación herbácea rala.-
- 8.- Zonas sin vegetación, peñascos de los morros, desiertos, dunas, zonas urbanas, carreteras.-

LA APLICACION DE REGLAS DE REGIONALIZACION.-

El conjunto de reglas que hemos presentado en éste trabajo es muy incompleto, pero pensamos que el nos permite un análisis regional desde el punto de vista hidrológico, pues nos indica como trabajar para hacer aparecer zonas con características hidrológicas homogéneas y en cuales de ellas podremos tomar una cuenca como representativa.-

Por otra parte, éstas reglas debieran permitir la mejoración del índice de aptitud para la esorrentía de C. Auvray, dando cuenta de una forma total de los factores físicos de una cuenca y evaluado cualitativamente según una escala de 0 a 10.-

Para regiones de clima homogéneo se podría tomando en cuenta cada una de las reglas relativas a permeabilidad, relieve y vegetación constituir índices secundarios representativos de la influencia de cada uno de éstos factores sobre el escurrimiento, después integrarlos en uno solo mediante x procedimiento, éste índice de aptitud para la esorrentía proporcionará excelentes servicios en los estudios de sintesis regional de las características del escurrimiento en áreas pequeñas.-

Se anexa al final un ejemplo de la determinación de regiones hidrológicas homogéneas a partir de las reglas propuestas en éste -

trabajo y que se realizó con motivo de un estudio de recuperación regional en el Nor-este de Brasil. Este trabajo se pudo ejecutar en una jornada sobre el plano a escala 1: 500.000, con una superficie base de Quinientos Kilometros Cuadrados (500 Kms^2) para aplicar la regla del relieve, siendo bién conocidos los datos climáticos, geológicos y de vegetación, así como también el terreno recorrido.-

La zona estudiada representaba aproximadamente Ochenta Mil Kilometros Cuadrados (80.000 Kms^2).-

Tanto por las dimensiones del proyecto como por los recursos utilizados, este ejemplo, corresponde, al caso más frecuente y para el cual el conjunto de reglas que proponemos tiene mayor validéz:

- dividir la zona en estudio en un número suficiente de regiones - para que cada una de ellas sea hidrológicamente homogénea.-

- tener cuidado de no extender demasiado ésta regionalización, ya que al extremo todas las cuencas (aquí de 500 Kms^2) se diferencian entre sí.-

En otras palabras, a la escala de pocas decenas, posiblemente pocas centenas de miles de kilometros cuadrados, el estudio debe perseguir dos objetivos:

- a) Un objetivo principal que es hacer aparecer las regiones hidrológicas homogéneas y por consecuencia, permitir el establecimiento de un programa de ubicación de cuencas representativas.-

b.- Un objetivo secundario que a la postre, será hacer posible en la zona de estudio la extrapolación de los resultados obtenidos en las cuencas representativas. Por ejemplo se podría utilizar las reglas de la regionalización para determinar un índice de aptitud a la escorrentía.-

Sobre el plan práctico del desarrollo del trabajo, a esta escala el clima es generalmente homogéneo salvo ciertas divergencias, y es la regla de la permeabilidad que parece ser el elemento esencial de la regionalización.-

La regla del relieve que provoca la última división parece haber sido aplicada así:

- examinar cada cuenca de aproximadamente Quinientos Kilómetros Cuadrados (500 Kms^2), pero tomando en cuenta sólo las tendencias generales medias de un sector dado para clasificar el relieve.-

- despreciar todas las características locales al interior de las áreas de Quinientos Kilómetros Cuadrados (500 Kms^2).-

Si se establece un equilibrio en la aplicación de las reglas de la regionalización, se acuerda la preponderancia de uno u otro término del equilibrio (y esto corresponderá a un nuevo método de aplicación de las reglas y a un nuevo tipo de problema).-

Para una zona de dimensiones limitadas a pocos miles de Kms², el problema no es de hacer aparecer las regiones hidrológicas homogéneas, sino de localizar las divergencias locales, como por ejemplo desde el punto de vista de la aptitud a la esorrentía. A ésta escala, el clima es generalmente homogéneo y la permeabilidad pierde su importancia en favor del relieve y de la vegetación que vienen a ser la clave principal del análisis. Se emprenderá el estudio para cuencas inferiores a los 500 Kms² por ejemplo 25 a 50 Kms² y las anotaciones formuladas anteriormente en cuanto a la aplicación de la clave del relieve valederas aquí, cambiando el área de base. La aplicación de la clave de vegetación debe hacerse con el mismo criterio.-

Por otra parte, la regionalización hidrológica es la única finalidad de un estudio sobre una zona que sobrepase los 100.000 Kms², se aboca entonces a definir grandes regiones bien diferenciadas dentro de las cuales puedan ser ubicadas cuencas representativas de las tendencias generales medias de la región. A ésta escala, la clave del relieve que es difícil hacer en áreas superiores a Quinientos Kilometros Cuadrados (500 Kms²), consiste en seleccionar en las zonas ya individualizadas, (aplicando las claves

del clima y de la permeabilidad), algunas cuencas de Quinientos Kilometros Cuadrados (500 Kms²) que aparecen a primera vista, representar la tendencia media de un sector para fijar la clase de relieve de éste sector .-

Las tres (3) diferentes posibilidades de aplicación de las reglas de regionalización pueden coexistir en una misma zona, pero parece que los límites que hemos sugerido para separar los diferentes campos de aplicación son de magnitud media.-

En ciertas partes del mundo, los factores físicos (clima, suelos, relieve) varían considerablemente en pequeñas distancias como en los países alpinos ó cualquier otra región montañosa de la costa mediterránea así como en los países andinos, bajo estas condiciones, los límites de campo debieran reducirse y el interés del campo superior podría disminuir considerablemente, pues no habrá más regiones hidrológicas homogéneas de gran extensión.-

Por el contrario, los límites podrían aumentarse en las extensas llanuras del norte y del este europeo, así como sobre el continente Oeste-Africano ó la selva Amazónica; entonces el campo superior de aplicación de las reglas tomaría gran importancia y sería innecesario utilizar el campo inferior pues la heterogeneidad hidrológica de detalles no existiría.-

Entre los tres campos de aplicación de las reglas de regionalización que acabamos de definir, el campo intermedio que pa-

rece el más extendido y el campo superior según los objetivos que persiguen, exigen que la aplicación de dichas reglas sea de lo más simple y rápido posible.-

Esta necesidad práctica justifica a nuestro parecer la escogencia que hemos hecho de utilizar para regiones climáticamente homogéneas, claves sucesivas de permeabilidad y de relieve y no una clave única que se apoye en la geomorfología cuantitativa.-

La Geomorfología cuantitativa, que se basa en las leyes de Horton - entre otros, está hoy día en capacidad de ser un excelente instrumento de trabajo para el Hidrólogo. Los trabajos de geomorfólogos americanos (Leópolo, Krimgold, Strahler, Melton, Miller) como de sus seguidores franceses (Tricart, Hirsch) han implantado la determinación práctica de numerosos parámetros geomorfológicos.-

-número y longitud media de las corrientes de diversas órdenes.
-relaciones de confluencia y longitud
-densidad de drenaje, etc.-

Pero el cálculo de éstos diversos parámetros es muy delicado y largo y exige a la vez el uso de planos bastante exactos (reproducción exacta de la red hidrográfica), cálculos y extrapolaciones gráficas. Verdaderamente se justifican al momento de la interpretación y de la cartografía, aptitudes a la escorrentía efectuadas después de los estudios sobre el terreno.-

Nosotros hemos estimado que éste trabajo era demasiado complicado para el fin que buscábamos: Implantación, de antemano, de cuencas representativas de zonas hidrológicas similares.-

Sin embargo, debe reconocerse que la escogencia de un índice geomorfológico en lugar de las claves "permeabilidad" y "relieve" no deja de ser de interés al menos en los dos casos siguientes:

- a).- en el campo inferior de aplicación de nuestras reglas de regionalización, pues se trata aquí a menudo de un trabajo muy parecido a la interpretación (homogeneidad bajo el ángulo de la aptitud a la escorrentía).-
- b).- Cuando no hay planos altimétricos. Este caso puede ser muy frecuente en numerosos países sub-desarrollados y nos parece interesante que sea analizada la posibilidad de una sustitución de nuestras claves de relieve por una clave geomorfológica que se determinará de la forma más simple. Este punto necesitaría por sí solo un estudio particular.-

ENSAYO DE DETERMINACION DE REGIONES HIDROLOGICAS HOMOGENEAS EN LA CUENCA DEL JAGUARIBE. (CEARA - BRASIL).-

Las partes central, meridional y oriental del Estado de Ceará están completamente ocupadas por la cuenca hidrográfica del río Jaguaribe cuya área es casi 80.000 Kms², es decir más de la mitad de la superficie del estado.-

Situada dentro del polígono de sequía, esta cuenca goza de un clima homogéneo, tropical húmedo con invierno seco y tendencia isotérmica (menos de 5°C de diferencia entre las temperaturas medias del mes más caliente y el más frío) cayendo en el tipo-Awi de la clasificación de Köppen. El problema que se nos presentó consistía en precisar los datos del escurrimiento (aportes anuales, irregularidad interanual y gastos máximos de crecienta excepcional) necesario a la racionalización de la política de retención superficial de las aguas para satisfacer las necesidades humanas animales y agrícolas.-

En éste clima homogéneo, hemos preferido hacer resaltar dos divergencias a ambos lados del valor medio de las precipitaciones: 600 a 800 mm. por año, el uno más lluvioso en tres sectores (dos con altitud sobre los 400 mts, el tercero al nivel del mar), el otro más seco al extremo oeste de la cuenca.

Hemos adoptado así tres clases de clima homogéneo de humedad-creciente:

- H1.- Precipitaciones medias anuales menores a 600 mm., para un área de 6.500 Kms² al extremo oeste de la cuenca.-
- H2.- Precipitaciones medias anuales entre 600 y 800 mm. sobre la casi totalidad de la cuenca (80% aprox.).-
- H3.- Precipitaciones medias anuales superiores a 800 mm. - en tres sectores (Cariri y Sierra de Caririagú, Sierra de Pereiro y nivel del mar, cerca de Aracati) cubriendo aproximadamente 5.000 Kms².-

El plano geológico y los estudios efectuados por los Hidrólogos permiten abordar fácilmente el segundo estadio de división regional. A excepción de tres sectores limitados por terrenos sedimentarios, al extremo Sur, al centro y al extremo Nor-este

de la cuenca que totalizan una área reducida, los terrenos "ante-cámbricos" generalmente impermeables ocupan la totalidad de la cuenca, Según la clave propuesta en la nota general, adoptaremos tres clases a permeabilidad creciente:

- P1.- Terrenos impermeables, sobre socalo ante-cámbrico .-
- P2.- Terrenos ligeramente permeables con mesa freática localizada: cuencas de Icó y de Iguatu, zona de grés inferiores al pié de la chapada de Araripe al Sur y Valle bajo aluvial - al norte.-
- P3.- Terrenos permeables: Chapada de Araripe al Sur, Chapada de Apodí al norte y dunas costeras.-

La sub-división en base a características del relieve fué efectuada sobre un plano a escala 1: 500.000 con curvas de nivel figuradas equidistantes 100 m. El conjunto de la cuenca fué analizada procediendo por grupos hidrográficos de 300 a 500 Kms² de área sin tomar en cuenta los ríos más importantes.-

Se han aplicado las reglas propuestas en la nota general, que han permitido diferenciar cuatro clases de relieve a partir de límites de la pendiente media de la cuenca establecidos para 500 Kms²:

- R1.- - pendientes muy suaves menores a 1,25 m/km
- R2.- - pendientes suaves entre 1,25 y 2,5 m/km
- R3.- - pendientes moderadas entre 2,5 y 5 m/km
- R4.- - pendientes bastante fuertes entre 5 y 12,5 m/km

No hemos introducido otra clasificación, pués la vegetación de la casi totalidad de la cuenca nos pareció encajar en la clase 5 de la nota general: tanto sabana entre mezcladas de espineros (caatinga), como cultivos que no protegen eficazmente el suelo en época lluviosa.-

Es de notar sin embargo que la vegetación bastante densa y relativamente protectora de las Chapadas de Araripe y de Apodí podría situarse en la clase 3 ó la 4 y aumentar así el consumo por evapotranspiración.-

Los diferentes límites de clases de clima, de permeabilidad y de relieve han sido trazados sobre un plano a escala 1:1.000.000, la conjugación de los factores H1 a H3, P1 a P3 y R1 a R4, hace aparecer-

varias agrupaciones distintas, por asociación de tres factores. Se cuentan 18 formando 33 sectores geográficos diferentes, Haremos una recapitulación en el cuadro siguiente:

Estas agrupaciones cubren aspectos hidrológicos muy variables, - desde la asociación P3R1 que representa zonas lisas sin escurrimiento superficial donde la infiltración alimenta los acuíferos, hasta P1 R4 que representa para la cuenca del Jaguaribe, la máxima aptitud a la escorrentía.-

Es importante tener en mente los siguientes puntos antes de utilizar éste estudio cartográfico:

- a) En nuestro corte geográfico, hemos eliminado todos los micro-detalles para conservar las opciones esenciales.-
- b) La presencia de 18 agrupaciones no excluye, la posibilidad (dadas ciertas características del escurrimiento) de una respuesta idéntica en varios de ellas.-
- c) Entre el ensayo previo de una individualización de las regiones hidrológicas homogéneas y la determinación de características cuantitativas de regimenes de cada región a partir de estudios puntuales, hay un trecho todavía sin conocer que no es recomendable franquear muy rápido.-

Toda tentativa de generalización de estudios en cuencas representativas hechas para una agrupación determinada en la totalidad - de la superficie cubierta por dicha agrupación así como en otra-agrupación vecina, debe ser realizada solamente por un Hidrólogo experto.-

No nos resta sino desear que éste trabajo clarifique la situación y abra perspectivas alentadoras para el establecimiento de normas regionales de alimentación y explotación de pequeñas presas.-

En la cuenca del Jaguaribe, los estudios de cuencas representativas se han basado en dos agrupaciones:

- H3 P2 R4 a partir de las cuencas del Carirí cuyos datos podrían ser empleados, después adaptación, para todas las agrupaciones de P2 con R3 ó R4 para cualquier H.-
- H2 P1 R1 a partir de las cuencas de Juatama cuyos datos podrían ser utilizados para las agrupaciones de P1 con R1 y R2 para cualquier H.-

Un estudio de cuenca representativa sobre agrupación P1-R3 ó P1-R4 permitirá llenar una laguna (escorrentía fuerte) y de cubrir con los estudios ya emprendidos, la casi totalidad de la cuenca del Jaguaribe, a excepción de las Chapadas tipo - P3-R1 para las cuales el solo estudio de la cuenca superfi_ cial no aportará informaciones suficientes.-

AGRUPACIONES HIDROLOGICAS HOMOGENEAS.-

- | | | |
|------|--------|--|
| 1.- | H3P3R1 | Dunas de Aracati, al este de La Chapada de Araripe.- |
| 2.- | H3P2R3 | Este de Milagros |
| 3.- | H3P2R4 | Este de Cariri |
| 4.- | H3P1R3 | Sur de Aurora |
| 5.- | H3P1R4 | Sierras de Caririagu y de Pereiro |
| 6.- | H2P3R1 | Centro de La Chapada de Araripe y Chapada de Apodi |
| 7.- | H2P2R1 | Valle bajo de Jaguaribe |
| 8.- | H2P2R3 | Cuencas de Iguatú y de Icó |
| 9.- | H2P2R4 | Norte de Araripe, Sur de Jatí |
| 10.- | H2P1R1 | Franja de Jardim a Mauriti |
| 11.- | H2P1R2 | Bajo Banabuirí y Bajo Palhano |
| 12.- | H2P1R3 | Franja de Quixeramobin a Solonópole y Orós. Bajo Figueredo. Alto Sitia. Norte de S.A de Ruisas.- |
| 13.- | H2P1R4 | Región de Lavras, entre Bastiões y Jaguaribe, franja de Iguatú a Senador Pompeu, Boa Viagem y Custodio. Alto Palhano.- |
| 14.- | H1P3R1 | Región de Jatí. Regiones de Assaré, Aina ba después franja de Saboeiro a Mombaga |
| 15.- | H1P2R3 | Extremo nor-oeste de la cuenca. Franja del este de Icó al norte de Jaguaribe.- |
| 16.- | H1P1R1 | Extremo oeste de la Chapada de Araripe. |
| 17.- | H1P1R3 | Sur de Campo Sales |
| 18.- | H1P1R4 | Sur-este de Taría |
| | | Campo Sales. Alto Jaguaribe más arriba de Arneiroz. |
| | | Región de Parambú.- |

BIBLIOGRAFIA

- AUVRAY (C).- "Estimation des debits de Crue décennaux en regime tropical". Comité Inter-Etats d' - etudes hydrauliques.-
- HIRSCH (F).- " Analyse morphométrique des réseaux fluvia- tiles. Application a la prevision des - débits d' eau"=-
- KRIMGOLD (D.B).- " Quantitative Geomorphology in soil and - water Conservation Research". U.S Dept. - Agriculture.-
- ROCHE (M).- " Hydrologie de Surface" ORSTOM
- WISLER (C.O) et BRATER (E.F).- Hydrology

Traducido del Francés y adaptado al Español por:

Luis Alberto Villamizar
Sala de Hidrología
Instituto Agrario Nacional

Setiembre 1.973