



ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA



VICEMINISTERIO DE DESARROLLO RURAL Y TIERRAS
DIRECCION GENERAL DE DESARROLLO RURAL
UNIDAD DE INFORMACION ESTUDIOS Y POLITICAS DE DESARROLLO RURAL SOSTENIBLE

MANUAL TÉCNICO

DETERMINACIÓN DE LA ESCORRENTIA A PARTIR DE LA PRECIPITACIÓN SOBRE UNA CUENCA

Autor: Miguel Murillo Illanes
JEFE UNIDAD DE INFORMACIÓN ESTUDIOS Y
POLITICAS DE DESARROLLO RURAL SOSTENIBLE

La Paz – Bolivia

Octubre - 2010

CONTENIDO

Contenido.....	i
Presentación.....	ii
Introducción.....	1
Condiciones de Humedad Antecedentes.....	1
Determinación de los números de combinaciones hidrológicas suelo – cobertura	
CN por medio de registros de precipitaciones y escurrimiento.....	3
Clasificación Hidrológica de Suelos.....	3
Clases de Uso y Tratamientos de Suelos.....	5
Clasificación.....	5
Complejos Hidrológicos Suelo - Cobertura.....	9
Determinación de los Complejos y CN.....	9
Forestaciones Masivas o Comerciales.....	10
Estimación de Escurrimiento Directo a Partir de la Precipitación.....	11
Desarrollo del Calculo.....	12
Aplicaciones y Ejemplos.....	21
Bibliografía.....	25

PRESENTACION

En los últimos años del siglo pasado, la humanidad, asumió un desafío, tomo el paradigma del desarrollo sostenible, para garantizar el bienestar de la población en armonioso desenvolvimiento con la naturaleza. En los principios del este nuevo siglo, el país, y muchos otros a nivel mundial, asumen también un nuevo paradigma, que es la soberanía alimentaria. Pero al mismo tiempo, el mercado mundial ante la crisis de los hidrocarburos (por escasez o elevados precios) inducen a los países desarrollados a optar por la producción agrícola para la obtención de combustibles (biocombustibles).

En tomo a este escenario, surgen posiciones encontradas a favor o en contra de la producción de biocombustibles, antes de atender a la seguridad y soberanía alimentaria. Además se discute sobre los impactos en la biodiversidad, en las sociedades y economías de países llamados en desarrollo.

En todo caso, las universidades están obligadas a desarrollar investigación y enseñar tecnologías con criterio social, económico, ambiental y financiero. En este proceso, es vital y estratégico para el ingeniero agrónomo y para el productor, comprender y asimilar que el aprovechamiento y manejo integral del suelo, agua y cobertura vegetal, resulta imprescindible para marcar la sostenibilidad de cualquier emprendimiento agroproductivo.

Por lo tanto, este trabajo fruto de una recopilación bibliográfica de fácil lectura y asimilación, brinda conceptos y conocimientos más que elementales sobre: La Ciencia del Suelo, la Pedología y la Edafología; y esta dirigido a todo estudiante interesado en profundizar y complementar sus conocimientos en las materias de Edafología, Física y química de suelos, Fertilidad de suelos, Manejo y conservación de suelos.

Miguel Murillo Illanes

DETERMINACIÓN DE LA ESCORRENTIA A PARTIR DE LA PRECIPITACIÓN SOBRE UNA CUENCA

METODOLOGIA DEL SERVICIO DE CONSERVACIÓN DE SUELOS DE LOS ESTADOS UNIDOS ¹

INTRODUCCIÓN.-

En este trabajo se describe la metodología, desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de Norteamérica, para estimar volúmenes de escorrentía resultantes de precipitaciones ocurridas sobre un área determinada. Las variables involucradas son: Tipos de suelos; Pendiente; Tipo y porcentaje de cobertura; Contenido de humedad del suelo; etc. Este procedimiento ha sido utilizado en numerosas cuencas de Estados Unidos y de otros países, entre ellos en la Argentina.

Básicamente, consiste en resumir en un número, llamado Número de Curva (CN), las características más importantes del terreno en estudio, con relación al efecto que producen sobre el escurrimiento del agua precipitada².

CONDICIONES DE HUMEDAD ANTECEDENTE (AMC).-

Es el índice empleado de humedad del suelo de la cuenca. Hay tres niveles considerados:

AMC - I: El más bajo potencial de escurrimiento, los suelos muy secos como para labrarlos.

AMC - II: Condición media.

AMC - III: El más alto potencial de escurrimiento. La cuenca está prácticamente saturada por las lluvias antecedentes.

La Condición de Humedad Antecedente (AMC) puede ser estimada por la precipitación de los cinco días antecedentes. Tal es el caso de la tabla 1, adaptada del material desarrollado en Port Worth, en la que figuran los límites de precipitación por categorías estacionales. Los mismos están graficados en las figuras 1 y 2 que muestra el carácter lineal del índice. No hay un límite superior para AMC-III como lo muestra la tabla 1. Los límites para la estación de dormición (reposo vegetativo) se aplican cuando los suelos no están congelados ni cubiertos de nieve.

Ejemplo 1.- Si la AMC para una cuenca debe ser estimada para la fecha 8 de diciembre, la cual está en estación de crecimiento, y si la lluvia de los cinco días precedentes es:

3 Diciembre.	4 Diciembre.	5 Diciembre.	6 Diciembre.	7 Diciembre.	Promedio
2,5 mm	0 mm	8,9 mm	3,8 mm	18,3 mm	33,5 mm

Entonces el total, de precipitación de 33,5 mm, usado en la columna de estación de crecimiento de la tabla 1, indica que el grupo de condición de humedad apropiado es AMC-I.

Tabla 1. Límites Estacionales de Precipitación para AMC

Grupo de AMC	Precipitación Total de los Cinco Días Antecedente	
	Estación de dormición	Estación de crecimiento
I	Menos de 12,7 mm	Menos de 35,6 mm
II	12,7 a 27,9 mm	35,6 a 53,3 mm
III	Más de 27,9 mm	Más de 53,3 mm

¹ Trabajo de traducción y compaginación de los capítulos 7, 8, 9 y 10 del Manual NHIM-102 (Agosto de 1972), del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos. Algunos temas han sido sintetizados y otros brevemente ampliados mediante la bibliografía detallada al final, con el objeto de ajustarlos, en la medida posible, a las necesidades regionales de regiones de Valles y Llanuras).

² Estas curvas, pueden apreciarse en la figura 3 Precipitación versus Escurrimiento Directo.

Figura 1.- Gráfico para la Estimación de la Condición de Humedad Antecedente.

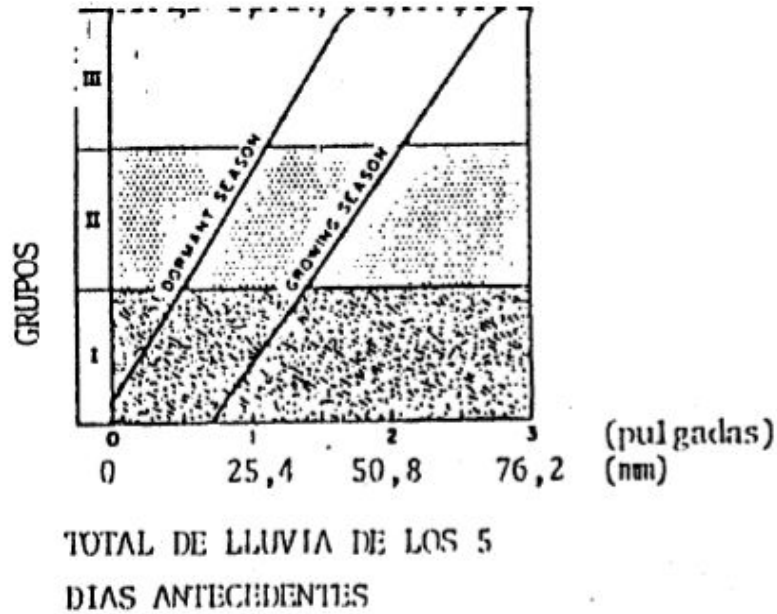
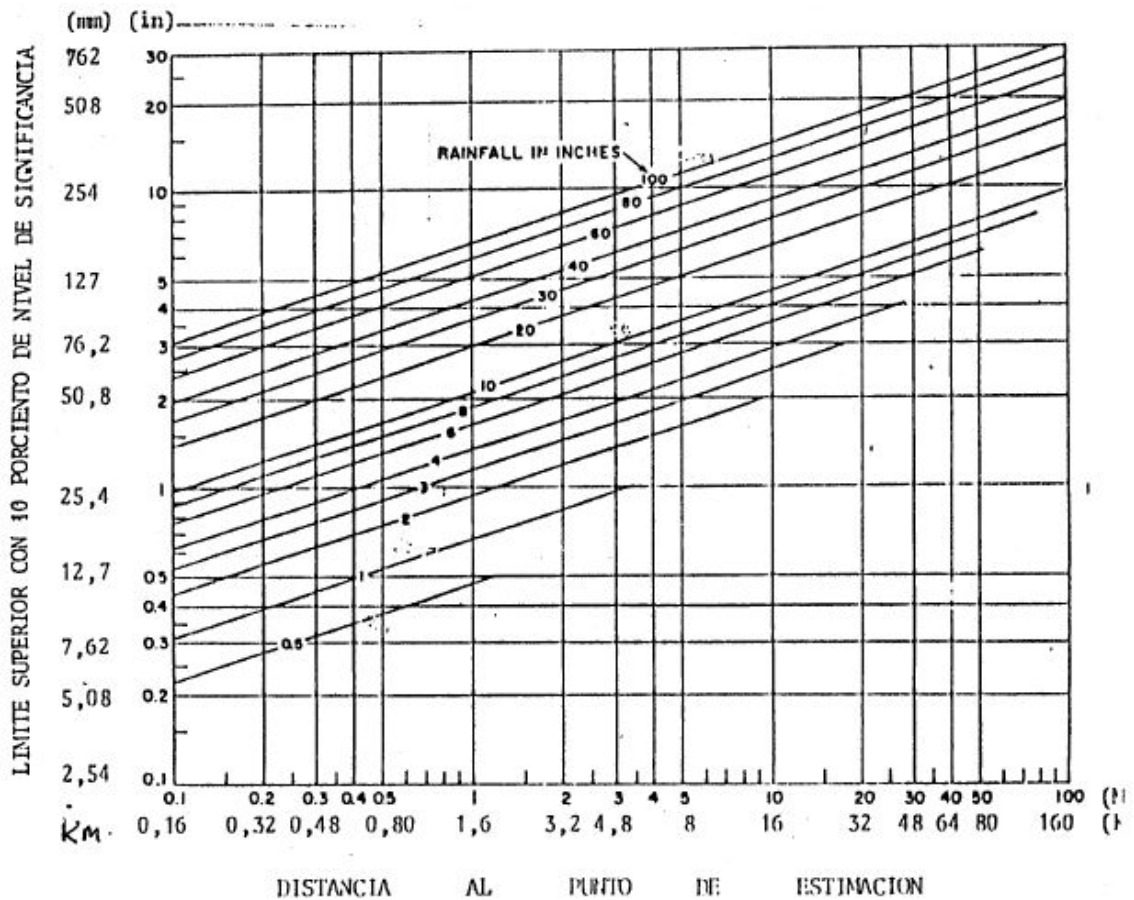


Figura 2. - Gráfico para la Estimación del Error por Exceso (positivo) en Cantidades de Lluvias Transpuestas. Se Aplica un nivel de significación del 10 por ciento. El error por defecto (negativo) es considerado 1/2 del error por exceso. El gráfico no se aplica a lluvias en áreas montañosas.



DETERMINACIÓN DE LOS NÚMEROS DE COMBINACIONES HIDROLÓGICAS SUELO – COBERTURA (CN) POR MEDIO DE REGISTROS DE PRECIPITACIONES Y ESCURRIMIENTO.-

Los registros de precipitación y escurrimiento para las avenidas anuales, son el mejor medio para determinar el CN, y esos CN son mejores que los obtenidos de otras formas.

El método del siguiente ejemplo se aplica a la condición de humedad antecedente (AMC-II). Teniendo los datos de precipitación, y el escurrimiento correspondiente se procede así:

Ejemplo 2:

- 1- Se superpone una hoja transparente a la fig.3.
- 2- Se gráfica escurrimiento contra precipitación.
- 3- Se busca la curva de la figura 3 que divida el punteado en dos números igual de puntos. Puede ser necesario interpolar gráficamente entre dos curvas.
- 4- El CN de la curva obtenida es el que corresponde a la cuenca.

Mediante la relación dada en la tabla 6, pueden calcularse las curvas para condiciones I y III. Pero el CN en condiciones antecedentes específicas puede ser estimado por otros métodos, uno de los cuales es el flujo base antecedente.

Ejemplo 3: Usando los datos de precipitación y escurrimiento se determina la relación entre el flujo base antecedente y el CN para una escorrentía subsiguiente. Para ello:

1. Se entra en la figura 3 con cada lluvia y su escurrimiento, y se encuentra la CN para cada período de precipitación.
2. Se encuentra el valor de S para cada CN, usando las columnas 1 y 4 de la tabla 6.
3. Se gráfica cada flujo base antecedente contra su S asociado, usando papel logarítmico, y se dibuja la línea de relación. Use una pendiente de -1, a menos que haya una fuerte indicación de una pendiente distinta. Ubique la línea de manera que quede igual número de puntos de cada lado. Si se adosa una escala de CN al margen del gráfico, se facilitará su uso.

Nota: los ejemplos desarrollados con sus respectivos gráficos pueden ser consultados en el Manual NEH-4 del S.C.S., capítulo 5. En el capítulo 18 del mismo se discute los tests de significación de las relaciones.

CLASIFICACIÓN HIDROLÓGICA DE SUELOS.-

Las propiedades del suelo influyen en los procesos de generación de escurrimiento a partir de la precipitación y deben ser consideradas aunque más sea indirectamente, en los métodos de estimación de escurrimiento. Cuando el escurrimiento producido por lluvias individuales es de mayor importancia, como en los trabajos de prevención de aluviones, las propiedades pueden ser representadas por un parámetro: la velocidad mínima de infiltración obtenida en un suelo después o luego de humedecimiento prolongado. La influencia de la superficie y de los horizontes está implícita. La influencia de la cobertura vegetal se trata independientemente. Este parámetro, que indica el potencial de escurrimiento de un suelo, es la base de la clasificación cualitativa de todos los suelos en cuatro grupos. La clasificación es amplia, pero puede dividirse en subgrupos cuando se justifique tal refinamiento.

Velocidad de infiltración: se entiende como la velocidad a la cual el agua entra en el suelo desde la superficie, y que está controlada por las condiciones de esta última.

Velocidad de Transmisión: como la velocidad a la cual el agua se mueve en el suelo, la que es controlada por los horizontes.

Los grupos hidrológicos de suelos, definidos por los científicos del Servicio de Conservación de Suelos, son:

- A** - (Bajo Potencial de Esgurrimiento). Suelos que tienen alta velocidad de infiltración, aún cuando están muy húmedos. Consisten principalmente en arenas o grava; profundas, bien a excesivamente drenadas. Estos suelos tienen alta velocidad de transmisión. Incluyen: Psammets, excepto por aquellas en los subgrupos Líticos. Aquicos o Aquodicos; suelos que no estén en los grupos C o D y que pertenezcan a las familias: fragmentarias, esqueleto arenosas o arenosas; suelos grosarénicos de Udults y Udalfs; y suelos en subgrupos Arénicos de Udults y Udalfs, excepto por aquellas en familias arcillosas o finas.
- B** - Suelos que tienen moderadas velocidades de infiltración cuando están bien húmedos. Consisten principalmente en suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados, con textura moderadamente fina a moderadamente gruesa. Con moderada velocidad de transmisión. (Suelos que no están en los grupos A, C o D).
- C** - Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten principalmente en suelos con una capa que impide el descenso del agua, o suelos con textura moderadamente fina a fina. Tienen lenta transmisión de agua. La infiltración lenta puede deberse a sales o álcalis en el suelo o a mesas de agua moderadas. Pueden ser pobremente drenados o bien a moderadamente bien drenados con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta (fragipan, hardpan, sobre roca dura) a poca profundidad (50 - 100 cm). Comprende suelos en subgrupos albicos o aquicos; suelos en subgrupos arénicos de aquents, aquepts, aquells, aqualfs, y aquults en familias francas; suelos que no están en el grupo D y que pertenecen a las familias finas, muy finas o arcillosas excepto aquellas con mineralogía caolinítica, oxídica o haloisítica; humods y orthods; suelos con fragipanes de horizontes petrocálcicos; suelos de familias "poco profundas" que tienen subestratos permeables; suelos en subgrupos líticos con roca permeable o fracturada que permita la penetración del agua.
- D** - (Alto Potencial de Esgurrimiento). Suelos con infiltración muy lenta cuando muy húmedos. Consisten principalmente en suelos de arcilla con alto potencial de expansión. Suelos con alto nivel freático permanente. Suelos con una capa de arcilla o arcilla endurecida en o cerca de la superficie. Suelo poco profundo sobre material bastante impermeable. Suelos con muy lenta infiltración debido a la presencia de sales o álcalis. Tienen lenta transmisión de agua. Incluye: todos los Vertisoles, Histosoles y Aquods; suelos en Aquents, Aquepts, Aquols, Aqualfs y Aquults, excepto los subgrupos arénicos en familias francas; suelos con horizontes nátricos; suelos en subgrupos líticos con subestratos impermeables; y suelos en familias poco profundas que tienen un subestrato impermeable.

En los Estados Unidos y Puerto Rico hay más de 4.000 suelos clasificados. Las clasificaciones originales se basaron en el uso de información de precipitación - escurrimiento de pequeñas cuencas o en determinaciones con infiltrómetro, pero la mayoría se basa en los juicios de edafólogos que usaron propiedades físicas del suelo para la toma de decisiones. Clasificaron un suelo en un grupo particular comparando su perfil con los de suelos ya clasificados. Asumieron que las superficies del suelo estaban desnudas, se había producido la máxima expansión y que la velocidad de precipitación superaba la velocidad de captación del suelo. La mayoría de las clasificaciones se basan en la premisa de que suelos similares en profundidad, contenido de materia orgánica, estructura y grado de expansión al saturarse, responderán de manera similar durante una lluvia con excesiva intensidad.

Determinación de Áreas: No es frecuentemente necesario medir con precisión las áreas de grupos de suelos, ya sea por planimetría o por pesadas de cortes de mapas.

El máximo detalle no iría más allá de lo siguiente:

1. Preparar un mapa en el que figuren los suelos individuales en una unidad hidrológica.
2. Luego, clasificar los suelos en grupos.
3. A continuación se superpone un reticulado al mapa y se cuenta y tabula el número de intersecciones que caen en cada grupo.
4. Se calcula el porcentaje de área correspondiente a cada grupo de suelo.

Ejemplo 4: ver tabla 2.

Tabla 2. Cálculo de Porcentajes de Áreas de Grupos de Suelos.

Grupo de Suelo	N° de Intersecciones	Porcentaje
B	12	23*
C	32	63
B	7	14
Total	51	100

(*) Porcentaje para B: $(100) \times 12/51 = 23$

Número de Grupos de Suelos a usar: A menudo uno o dos grupos predominan en una cuenca y otros cubren sólo una pequeña parte. El que los grupos pequeños se unifiquen con los mayores depende de su clasificación. Por ejemplo, una unidad hidrológica con el 90% de sus suelos en el grupo A y el 10% en el grupo D, tendrá la mayor parte de su escurrimiento proveniente de los suelos D, y considerar todos los suelos como A originaría una seria subestimación del escurrimiento. Con grupos más parecidos (A y B, B y C, C y D) las diferencias serán menos importantes, pero hay que probarlo.

Dos grupos se combinan en uno solo si uno de ellos cubre menos del 3% de la unidad hidrológica.

Las superficies impermeables deben manejarse separadamente porque producen escurrimiento aún cuando el grupo D no lo hace.

Subgrupos: Sí es necesario trabajar con subgrupos, el CN para ellos puede obtenerse por interpolación lineal en la tabla 3. Los subgrupos pueden ser designados B+ o C- por ejemplo. Una clasificación más elaborada (B1, B2, B3 etc.) no se justifica, a menos que las clasificaciones de suelos se hicieran con información de precipitación-escurrimiento.

Otra metodología recomendada, es la de poder organizar grupos intermedios entre los grupos conocidos (A, B, C, D) según las características de la cuenca, por ejemplo hacer la combinaciones y/o adecuaciones para lograr grupos A, AB, B, CB, C, CD y D.

CLASES DE USO Y TRATAMIENTO DE SUELOS.-

Estas clases se utilizan en la determinación de los complejos hidrológicos de suelo-cobertura, que se emplean en la estimación del escurrimiento producido por la precipitación.

CLASIFICACIÓN.-

Uso del Suelo: consiste en la cobertura vegetal, e incluye todo tipo de vegetación, camas vegetales, mantillos y suelos en barbecho. También aquellos que no son de uso agrícola (lagos, pantanos, etc.) y superficies impermeables (rutas, techos, etc.)

Tratamiento del Suelo: se aplica principalmente a usos agrícolas del suelo, e incluye prácticas mecánicas tales como cultivar en terrazas o curvas de nivel, y prácticas de manejo tales como rotación de cultivos o control de pastoreo.

Las clases: consisten en las combinaciones de uso y tratamiento factibles de encontrar en las cuencas. Las clases se determinan por observación, o por medición de la densidad y extensión, y el tipo de cobertura en áreas muestrales.

Clases: Están listadas en la tabla 3, en la cual también se encuentran los números de curva de escurrimiento (CN) para los complejos hidrológicos suelo-cobertura.

Tabla 3. Número de las Curvas de Escurrimiento para las Diferentes Combinaciones Hidrológicas de Suelo – Vegetación, Para cencas en Condición de Humedad II (AMC-II)

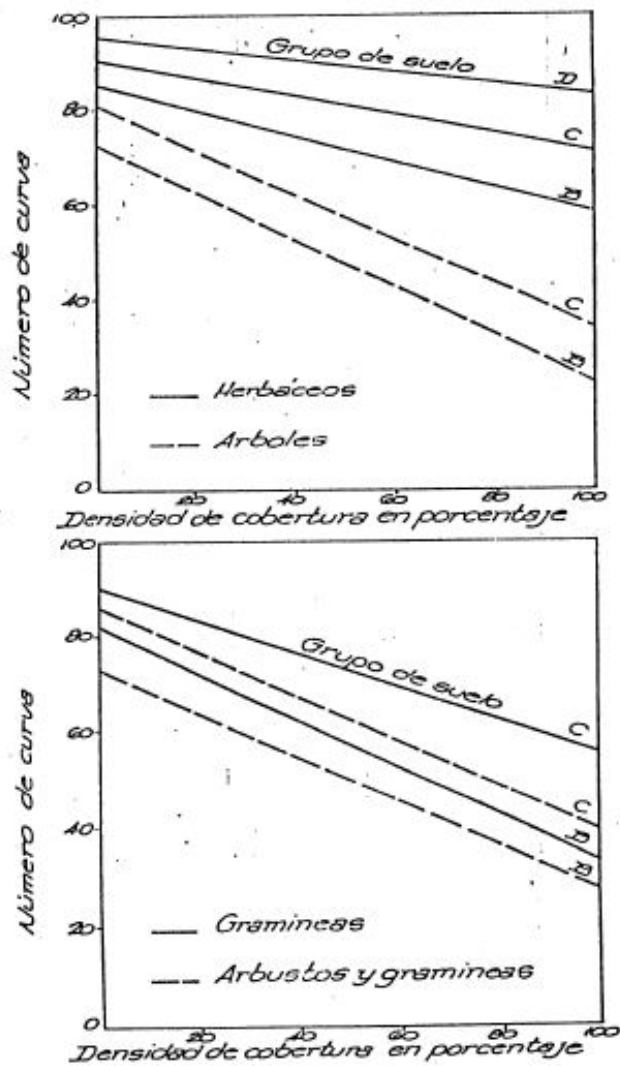
Complejo hidrológico de Suelos			Grupo Hidrológico de Suelos			
Uso del Suelo y Cobertura	Tratamiento o Método	Condición para la Infiltración	A	B	C	D
Barbecho	SR		77	86	91	94
Cultivo en hileras	SR	Mala	72	81	88	91
	SR	Buena	67	78	85	89
	C	Mala	70	79	84	88
	C	Buena	65	75	82	86
	CyT	Mala	66	74	80	82
	CyT	Buena	62	71	78	81
Granos pequeños	RR	Mala	65	76	84	88
	SR	Buena	63	75	83	87
	C	Mala	63	74	82	85
	C	Buena	61	73	81	84
	CyT	Mala	61	72	79	82
	CyT	Buena	59	70	78	81
Legumbres tupidas o rotación de praderas	SR	Mala	66	77	85	89
	SR	Buena	58	72	81	85
	C	Mala	64	75	83	85
	C	Buena	55	69	78	83
	CyT	Mala	63	73	80	83
	CyT	Buena	51	67	76	80
Pradera o pastizal		Mala	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
	C	Mala	47	67	81	88
	C	Buena	10	35	70,,	79
	C	Regular	25	59	75^'	83
		Buena	30	58	71	70
Bosques		Mala	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Cascos de estancias			59	74	82	86
Caminos de tierra			72	32	87	80
Superficie dura			74	84	90	92

SR = Hileras rectas

C = En curvas de nivel

T = Terrazas

CyT = Terrazas a nivel



Terreno cultivado: Barbecho; es el uso y tratamiento agrícola con el más alto potencial de escurrimiento debido a que el suelo se mantiene lo más descubierto posible con el objeto de conservar humedad para un cultivo subsiguiente. La pérdida debida al escurrimiento se compensa con la ganancia por evitar la transpiración.

Otros tipos de barbechos, que no están listados, pueden evaluarse comparando sus condiciones con las de los que sí lo están.

Siembra en hileras: Es cualquier cultivo en hileras suficientemente separadas para que la mayor parte del suelo esté expuesta al impacto de la precipitación a través del ciclo vegetativo. En el momento de la plantación equivale al barbecho y esto puede repetirse luego de la cosecha.

Las hileras pueden ser rectas o seguir las curvas de nivel. Pueden estar en una pobre o buena rotación.

Grano fino: (cebada, trigo, avena, lino) Se siembran en hileras tan próximas entre si que el suelo no queda expuesto; salvo en el momento de la siembra y poco tiempo después. Los tratamientos de suelo son los mismos que en cultivos en hileras.

Leguminosas de siembra densa: (alfalfa, trébol) Pueden estar sembradas en surcos próximos o al voleo. Esta cubierta puede mantenerse más de un año, dando una protección

anual completa al suelo. También se usa con esta cubierta los tratamientos del suelos correspondientes a cultivos en hileras, excepto por los cultivos al voleo.

Rotaciones: Son secuencias planeadas de cultivo. Su propósito es mantener la fertilidad del suelo, obtener determinados productos, o evitar la erosión del suelo. Influyen mucho en las condiciones hidrológicas del suelo, y en este sentido varían desde pobres a buenas, en proporción a la densidad de la vegetación utilizada.

Las rotaciones, se evalúan por su efecto hidrológico. Son rotaciones pobres aquellas en que por ejemplo se siembra granos en surco año tras año en el mismo campo.

Las buenas rotaciones generalmente contienen alfalfa o alguna otra leguminosa o pasto de siembra densa que mejoren la textura y consecuentemente aumenten la infiltración. Su efecto hidrológico puede extenderse más allá del ciclo de cultivo.

Hileras rectas: Son campos cultivados en hileras rectas ya sea en sentido paralelo o perpendicular a la pendiente. Cuando la pendiente es menor al 2%, cultivar en hileras perpendiculares a la pendiente equivale a sembrar siguiendo las curvas de nivel.

En curvas de nivel: Se trabaja el campo siguiendo lo más posible las curvas de nivel. El efecto hidrológico se debe al almacenamiento superficial en los surcos, que aumenta el tiempo durante el cual se produce la infiltración. La magnitud del almacenamiento depende no sólo de las dimensiones de los surcos, sino también de la pendiente, el cultivo y del sistema de plantación.

Terrazas: De extremo abierto, con las salidas empastadas (cubiertas de pasto) y surcos de contorno entre ellas. Esto incrementa las posibilidades de infiltración.

Pasturas: pueden ser evaluadas por medio de las tres condiciones hidrológicas que figuran en la tabla 4, que se basan en la efectividad de cobertura, no de producción de forraje. El porcentaje de área cubierta (densidad) y la intensidad de pastoreo se estiman visualmente.

El pastoreo (salvo en suelo seco) puede reducir la infiltración al disminuir la cobertura y compactar el suelo y su efecto puede durar varios años.

Tabla 4. Clasificación de Pasturas Naturales

Condición Vegetativa	Condición Hidrológica
Altamente pastoreada, sin mantillo o cobertura vegetal inferior al 50%	Pobre
No altamente pastoreada, cobertura vegetal de 50 a 75%	Media
Ligeramente pastoreada, cobertura vegetal superior al 75%	Buena

Un sistema alternativo de evaluación es aquel que usa densidad y peso pasto seco al aire. (Capítulo. 8, Manual N011-4 del S.C.S).

Los surcos en curvas de nivel duran más en pasturas naturales que en campos cultivados. Su duración depende de: suelo, intensidad de pastoreo y densidad de cobertura. Las dimensiones y el espaciamiento de los surcos varían con el clima y la topografía.

Las terrazas se usan poco en pasturas.

Pradera: Es un campo en el cual el pasto crece continuamente, protegido del pastoreo, y que generalmente se lo corta para heno.

Las praderas drenadas (freática baja) prácticamente no tienen escurrimiento, salvo en tormentas con alta intensidad de precipitación. Aquellas que tienen freática alta pueden estar tan húmedas que llegan a ser equivalentes a superficies de agua.

Bosques: En este caso se considera los pequeños relictos de bosques, bosquecillos aislados, pequeños bosques implantados para uso de granjas. Pueden evaluarse por medio de la tabla 5, la cual se basa en la efectividad de cobertura, no en la producción de madera. La condición hidrológica se estima visualmente.

Tabla 5. Clasificación de Bosques

Condición Vegetativa	Condición Hidrológica
Altamente pastoreada, o regularmente quemada. Se destruye el mantillo, los arbustos y matorrales	Pobre
Pastoreada, pero no quemada, puede haber algo de mantillo, pero estos bosques no son protegidos.	Media
Protegida del pastoreo. Suelo cubierto por mantillo y matorrales	Buena

Forestaciones Nacionales o Comerciales: Cuando cubren una gran parte del área de una cuenca, se puede consultar para su estudio la siguiente bibliografía: "Forest and Range Hydrology Handbook" U.S. Forest Service, Washington D.C. 1951.

Determinación de las Clases: Las clases de uso y tratamientos de suelos, quedan determinadas al mismo tiempo que el suelo se clasifica. Como los suelos, las clases se establecen para la unidad hidrológica.

La ubicación de las clases dentro de la unidad no se toma en cuenta. Una hoja de trabajo en la que figuran 11 clases (Uso del suelo y cubierta) en el orden dado en la tabla 3, es conveniente para tabular porcentaje, y es útil luego para calcular el CN ponderado.

Debería tomar menos de un día la clasificación de la cubierta de una cuenca de 1.000 Km²

COMPLEJOS HIDROLÓGICOS SUELO – COBERTURA.-

Una combinación de un grupo hidrológico de sucio (suelo) y una clase de uso y tratamiento de suelo (cobertura), es un complejo hidrológico suelo-cobertura. En éste acápite se dan tablas y gráficos de números de curvas de escurrimiento (CN) asignados a tales complejos. Su CN indica el potencial de escurrimiento de un complejo cuando el suelo no está congelado. Cuanto más alta la CN, mayor el potencial de escurrimiento.

DETERMINACIÓN DE LOS COMPLEJOS Y CN.-

Tierra Agrícola: En la tabla 3 se dan los complejos y la CN asignado para las combinaciones de los grupos de suelos y las clases de uso y tratamiento. También se dan algunos complejos que hacen más directa la aplicación de la tabla. A las superficies de agua y las impermeables que no están en la lista, siempre se le asigna CN =100.

Asignación del CN a los Complejos: La tabla 3 fue desarrollada de la siguiente forma: los datos fueron obtenidos de cuencas con un solo complejo (un grupo de suelo y una cubierta), encontrándose cuencas para la mayoría de los complejos listados. Por el método del ejemplo 2 se obtuvo un promedio de CN para cada cuenca, usando datos de precipitación-escurrimiento

correspondientes a la avenida anual. La superficie de las cuencas fue generalmente inferior a 2,6 Km.

El número de cuencas por complejo fue variado y las lluvias de un día o menos de duración. El CN de cuencas con el mismo complejo fue promediado, todos los CN para una cubierta fueron graficados, dibujándose una curva para cada CN, con mayor ponderación para el CN basado en datos de más de una cuenca. Cada curva se extendió tanto como fuera necesario para proveer de CN a los complejos no determinados. Todas las entradas de la tabla, salvo las últimas tres líneas, fueron extraídas de estas curvas.

Para los complejos arbitrarios en las tres últimas líneas se estimó las proporciones de las diferentes coberturas y se calculó el CN a partir de CN previamente derivado. La tabla 3 no ha sufrido cambios significativos desde que se la creó, en 1954, pero se han desarrollado tablas suplementarias para regiones especiales (ver documentos del SCS- USDA).

Uso de la Tabla 3: En los capítulos anteriores se describe el procedimiento de clasificación de los suelos y las cubiertas (o coberturas) de las cuencas: Luego el CN se lee directamente la tabla 3 y se aplica como se describe en los acápite siguientes:

FORESTACIONES MASIVAS O COMERCIALES.-

Se da una selección de las metodologías usadas por el Servicio Forestal de los Estados Unidos en los bosques del Este y Oeste de ese país, para determinar la CN, con el objeto de mostrar las diferencias con el procedimiento del Servicio de Conservación de Suelos.

Bosques en el Este de los Estados Unidos: En estas zonas húmedas, el grupo de suelo, el tipo de humus y su profundidad, son los factores principales para determinar el CN. Las hojas, corteza: sin descomponer y otros desechos vegetales en el piso del bosque, forman el mantillo del cual deriva el humus.

Este mantillo protege al humus de la oxidación y por ende entra indirectamente en la determinación. Si la profundidad del mantillo es inferior a 1,3 cm., el humus se considera desprotegido y la clase de condición hidrológica se reduce por 0,5.

El humus es la capa orgánica inmediatamente debajo de la capa de mantillo de la cual deriva. Puede consistir en Mull que es una mezcla íntima de materia orgánica y minerales (suelo); o en Mor que es prácticamente pura materia orgánica, casi irreconocible como originada del material del piso del bosque.

La profundidad del humus aumenta con la edad del bosque hasta que se alcanza un equilibrio entre los procesos de formación y los de eliminación. En condiciones favorables se puede producir hasta 30 cm. de humus. Pero el máximo en condiciones medias es de aproximadamente 15 cm.

Bajo buenas condiciones de manejo (protección, uso apropiado), el humus es poroso y tiene alta capacidad de infiltración y almacenamiento. Bajo malas prácticas de manejo (quemado, sobrepastoreo, exceso de cortes), el humus es suficientemente compacto como para impedir la absorción del agua.

El humus se evalúa por medio de los grados de compactación que son:

- 1) Compacto; Como los Mulls son firmes, los Mors tienen consistencia de fieltro.
- 2) Moderadamente compactos; estado de transición.
- 3) Suelos o friables; Los Mulls no son firmes y los Mors no parecen fieltro.

La congelación del humus compacto produce la forma concreta que inhibe la infiltración, mientras que el humus suelto toma forma granular o de estalactita, que no impide la infiltración.

La *condición hidrológica* de un área forestal es el potencial de generación de escurrimiento. La clase de condición se indica con un número entre 1 y cuanto más bajo el número, mayor el potencial

Determinación del CN para la Condición Hidrológica Presente: Se ubica los puntos de muestreo en el área; se determina grupo de suelo, profundidad del mantillo, tipo y profundidad de humus (por medio de calicatas). La CN se obtiene a partir de gráficos elaborados al efecto³

Determinación del CN para Condición Hidrológica Futura: La CN para condición hidrológica futura de un área forestal se determina en base a la mejora potencial del área (que se obtiene en tablas).

Mejoramiento Potencial: Es el potencial de mejoramiento de la condición hidrológica de un sitio por adecuado uso y tratamiento futuros. La fisiografía del sitio participa en la determinación del potencial. Un alto potencial indica un rápido ritmo de mejoramiento o progreso.

Masas Portales en el Oeste de los Estados Unidos: En estas regiones los principales factores a usar en la estimación del CN son: grupo de suelos, tipo y densidad de cobertura. La cantidad de mantillo se toma en cuenta cuando se estima la densidad de cobertura.

ESTIMACIÓN DE ESCURRIMIENTO DIRECTO A PARTIR DE LA PRECIPITACIÓN.-

Como la mayoría de las cuencas con las que trabaja el Servicio de Conservación de Suelos no están aforadas, el método fue desarrollado para utilizarlo con datos de precipitación y parámetros de las cuencas factibles de obtener en estas condiciones.

La principal aplicación del procedimiento es la estimación de cantidades de escurrimiento en hidrogramas de avenidas o en relación a los picos de crecida (avenida). Estas cantidades consisten en uno o más tipos de escurrimiento.

El entendimiento de los tipos de escurrimiento es necesario para aplicar el método adecuadamente en diferentes regiones climáticas. La clasificación de tipos aquí usada está basada en el tiempo que pasa desde que comienza la lluvia hasta que aparece el pico en el hidrograma. Se distinguen 4 tipos:

Escurrecimiento en Canal: Ocurre cuando la lluvia cae e una corriente de agua o en la superficie impermeable de una estación de aforo. Aparece en el hidrograma al comienzo de la precipitación y permanece durante su transcurso, variando con su intensidad. Normalmente los volúmenes son pequeños y no se les presta atención, salvo en estudios especiales.

Escurrecimiento en Superficie: Ocurre sólo cuando la velocidad de precipitación es mayor que la de infiltración. El escurrimiento fluye en la superficie de la cuenca hacia el punto de referencia. Este tipo aparece en el hidrograma después de satisfacer las demandas iniciales de interceptación, infiltración y almacenamiento superficial. Variará con la precipitación y termina durante, o poco después, que ella.

El escurrimiento superficial fluyendo en canales secos o en cuencas en climas áridos, semiáridos o subhúmedos, se reduce por pérdidas de transmisión, que pueden ser suficientemente grande como para eliminarlo totalmente.

Escurrecimiento Subsuperficial: Ocurre cuando la lluvia infiltrada encuentra una zona enterrada, de baja transmisión, viaja sobre la misma hacia la superficie, cuesta abajo, y

³ La ejemplificación completa referente a este tema puede calcularse en el Capítulo 9 del Manual NEH-4 del S.C.S. del los Estados Unidos.

aparece como una vertiente o aguada. Este tipo suele llamarse: "*flujo de retomo*", porque aparece en el hidrograma durante o poco después de la lluvia.

Flujo Base: Ocurre cuando hay un flujo bastante estable proveniente de depósitos naturales. El flujo viene de lagos o pantanos, o de un acuífero relleno por precipitación que se infiltra, o de escurrimiento superficial infiltrado, o de "*Almacenamiento de márgenes*", el cual se surte por la infiltración en las riberas del canal a medida que sube el nivel, y que drena nuevamente hacia la corriente cuando el nivel baja.

Este tipo pocas veces aparece suficientemente puesto que después de una lluvia como para tener influencia en el hidrograma correspondiente a la misma, pero el flujo base de una precipitación anterior si puede fluir. El flujo base debe tomarse en cuenta en el diseño del vertedero principal de una estructura de retardo de crecida.

Todos los tipos no aparecen regularmente en todas las cuencas. El clima es un indicador de los tipos probables. En regiones áridas, el flujo en cuencas pequeñas es casi siempre superficial, pero en regiones húmedas es generalmente subsuperficial. Pero una larga sucesión de lluvias produce flujo subsuperficial o flujo base aún en climas secos, aunque la probabilidad es menor.

En hidrología aluvional es común separar el flujo base y combinar todo los otros tipos en:

Escurrimiento Directo: que tiene proporciones desconocidas de escurrimientos superficial, subsuperficial y de canal. El método del Servicio de Conservación de Suelos estima el escurrimiento directo, pero las proporciones de flujo superficial y subsuperficial (se ignora el de canal), pueden ser apreciadas por el método de la CN, el cual es otro indicador del tipo de flujo. Mientras mayor sea la CN, mayor probabilidad hay de que el flujo sea superficial.

Este principio también se aplica para estimar el tiempo de retardo de la cuenca.

La relación precipitación-escurrimiento puede ser hecha para operar con un tipo particular de escurrimiento. Ha sido desarrollada para casos en que no se dispone más que de totales diarios precipitados (para una o más lluvias) y no se conoce nada de la distribución en el tiempo de esa precipitación.

La relación excluye el tiempo como una variable explícita, es decir, se ignora la intensidad de precipitación. Si todo, salvo duración o intensidad, es igual en dos lluvias, el escurrimiento estimado será el mismo en ambas.

Las cantidades de escurrimiento para incrementos de tiempos especificados de una lluvia pueden ser estimadas, pero, aún en este proceso, se ignora la intensidad de precipitación.

DESARROLLO DEL CÁLCULO.-

Si se usan records de precipitación natural y escurrimiento para una gran lluvia sobre un área pequeña, un gráfico de escurrimiento acumulado versus precipitación acumulada mostrará que el escurrimiento comienza luego de que algo de lluvia se acumula (hay una abstracción inicial de precipitación) y que las curvas de doble masa se vuelven asintóticas a una línea recta.

En papel aritmético y con escalas iguales, la línea recta tiene una pendiente de 45%. La relación entre precipitación y escurrimiento puede desarrollarse a partir de este gráfico, pero se comprenderá mejor el problema estudiando primero una lluvia en la cual la precipitación y el escurrimiento comiencen simultáneamente (no hay abstracción inicial).

Para una lluvia simplificada, la relación entre precipitación, escurrimiento y retención (lluvia no convertida en escurrimiento), en cualquier punto de la curva de masa, puede ser expresada como:

$$\frac{F}{S'} = \frac{Q}{P}$$

Donde:

- P = Retención actual
- S' = Potencial máximo de retención (S' es mayor o igual que P)
- Q = Escurrimiento actual
- P = Potencial máximo de escurrimiento (P es mayor o igual que Q)

Esta ecuación se aplica para escurrimiento en el sitio. Para cuencas grandes hay un retraso en la aparición del escurrimiento en el limnógrafo y la curva de doble masa produce una relación diferente. Pero si los totales de precipitación para P y Q se usan, la ecuación reciente se aplica aún en grandes cuencas, pues los efectos de retraso se eliminan.

El parámetro S' en la ecuación no contiene la abstracción inicial y difiere del parámetro S a usar más tarde. La retención S' es una constante para una lluvia particular, porque es el máximo que puede ocurrir bajo las condiciones existentes si la lluvia continua sin límites. La retención F varía porque es la diferencia entre P y Q en cualquier punto de la curva de masa

$$F = P - Q \quad \text{Retención actual} = \text{Potencial máximo de escurrimiento} - \text{Escurrimiento actual}$$

La ecuación puede escribirse:
$$\frac{P - Q}{S'} = \frac{Q}{P}$$

Despejando Q:
$$Q = \frac{P^2}{P + S'}$$

La cual es una relación precipitación-escurrimiento en la cual se ignora la abstracción inicial.

La abstracción inicial se introduce en la relación substrayéndola de la precipitación. El equivalente de la ecuación se transforma en:

$$\frac{F}{S'} = \frac{Q}{P - I_a} \quad \text{Entonces: } F = (P - I_a) - Q$$

Donde:

- Ia = Índice de Abstracción inicial
- F = es menor o igual que S
- Q = es menor o igual que (P - Ia)
- El parámetro S incluye a Ia S = S' + Ia

La ecuación se transforme en:

$$\frac{(P - I_a) - Q}{S} = \frac{Q}{(P - I_a)} \quad \text{Entonces: } Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S}$$

La cual es la relación precipitación escurrimiento tomando en cuenta la abstracción inicial.

La abstracción inicial consiste principalmente en intercepción, infiltración y almacenamiento superficial, todo lo cual ocurre antes que comience el escurrimiento. Las figuras 3 y 4 siguientes muestran la ubicación, de la **la** en una tormenta típica. Para eliminar la necesidad de estimación de estas variables en la ecuación, se desarrolló la relación entre **la** y **S** (que incluye a **la**), por medio de datos de precipitación y escurrimiento de pequeñas cuencas experimentales. La relación se discute más tarde en conexión con la figura 4. La relación empírica es:

$$Ia = 0,2 \times S$$

Sustituyendo:

$$Q = \frac{(P - 0,2 \times S)^2}{(P - 0,8 \times S)}$$

La cual es la relación lluvia-escurrimiento usada en el método del S.C.S. para estimar escurrimiento directo a partir de la precipitación

Parámetros de Retención: La ecuación de **la** establece que un 20% (promedio, como lo muestra la figura 4) del potencial máximo de retención **S**, es la abstracción inicial **la**, que es la intercepción, infiltración y almacenamiento de superficie, antes que comience el escurrimiento. El 80% restante es principalmente la infiltración que ocurre después que se inicia el escurrimiento.

Esta última infiltración es controlada por la velocidad de infiltración en la superficie del suelo o por la velocidad de transmisión en el perfil del suelo o por la capacidad de almacenamiento del perfil, cualquiera sea el factor limitante. Una sucesión de lluvias, tal como una al día durante una semana, reduce la magnitud de **S** cada día, porque el factor limitante no tiene oportunidad de recuperar su capacidad a través de la evapotranspiración o del drenaje. Pero, hay suficiente recuperación, dependiendo del complejo suelo-cobertura, para limitar la reducción.

Durante tal período de precipitación, la magnitud de **S** se mantiene virtualmente igual hasta el segundo o tercer día, aún cuando las lluvias son grandes, de manera que hay, desde el punto de vista práctico, un límite más bajo de **S** para un complejo suelo-cubierta dado. Similarmente hay un límite superior de **S**, dependiendo del complejo, más allá del cual, la recuperación no puede tomar **S** a menos que el complejo sea alterado.

En el método del S.C.S., el cambio en **S** (actualmente en CN) se basa en una condición antecedente de humedad (AMC), determinada por la precipitación total de los cinco días anteriores a la lluvia que se considera.

Se usan tres niveles de AMC: **AMC-I** es el límite más bajo de humedad o el límite más alto de **S**. **AMC-II** es el promedio para el cual se aplica la CN de la tabla 3, y **AMC-III** es el límite superior de humedad o el límite más bajo de **S**.

Las CN de la tabla 3 fueron determinadas por medio de gráficos de precipitación-escurrimiento, como se describió anteriormente. El mismo gráfico sirvió para obtener las CN en AMC-1 o en AMC-III. Esto es, las curvas de la figura 3, cuando se superponen en un gráfico, también mostraron cuales curvas encajaban mejor en los tercios superior (AMC-III) e inferior (AMC-I) del gráfico.

Las CN para alto y bajo niveles de humedad estaban empíricamente relacionadas a la CN de la tabla 3. Los resultados se muestran en las columnas 1, 2 y 3 de la tabla 6, la cual también da valores de **S** y de **la** para la CN en la columna 1. Las cantidades de lluvia en las que se basa la selección del AMC, se da en la tabla 1. La forma de uso de las tablas 1 y 6 se muestra más

adelante en este acápite. En la sección de comparaciones de escurrimientos reales y calculados, un ejemplo nuestra, que para ciertos casos, las AMC extremas pueden ignorarse y aplicarse sólo a la CN promedio de la tabla 3.

Relación de *la* a *S*: La ecuación de *la* se basa en los resultados que se muestran en la figura 4, que es un gráfico de *la* versus *S* para lluvias individuales.

Los datos derivan de records de lluvias naturales y escurrimiento de cuencas menores de cuatro hectáreas de superficie. La gran dispersión en el gráfico se debe principalmente a errores en la estimación de *la*. Las magnitudes de *S* fueron estimadas graficando lluvias totales y escurrimiento en la fig. 3, determinando la CN, y determinando el *S* de la tabla 6. Las magnitudes de *la* fueron estimada tomando la precipitación acumulada desde el principio de la lluvia hasta el momento en que el escurrimiento empezó.

Los errores en *S* fueron debidos a las determinaciones de lluvias totales promedio de la cuenca; estos errores fueron muy bajos. Los errores en *la* se debieron a una o más de las siguientes causas:

- 1) Dificultad en la determinación del momento en que la lluvia se inicia, debido al movimiento de las nubes y a la falta de instrumentos,
- 2) Dificultad para determinar el momento en que se inicia el escurrimiento, debido a los efectos de la lluvia en las instalaciones de medición (escurrimiento en canal) y al exceso del escurrimiento proveniente de la cuenca, y
- 3) Imposibilidad de determinar cuanta interceptación previa va camino a la superficie y contribuye al escurrimiento.

Los signos y magnitudes de estos errores no se conocen. En la figura 4, se gráfico sólo suficientes puntos como para mostrar la variabilidad de los datos. La línea de relación corta el gráfico en dos números iguales de puntos, la pendiente de la misma es 1:1 porque los datos no indican otra cosa. Se puede lograr una correlación estadística significativa entre *la* y *S* agregando más puntos y aumentando los grados de libertad, pero el error standard de la estimación permanecerá alto debido a las deficiencias en los datos.

Figuras, Gráficos y Tablas para Resolver La Ecuación de *Q*: Las figuras 3 y 4 contienen gráficos para la solución rápida de la ecuación. El parámetro CN (numero de curva de escurrimiento o número de complejo hidrológico suelo-cobertura) es una transformación de *S* que se usa para hacer más lineales la operaciones de interpolación, promedio y ponderación. La transformación es:

$$CN = \frac{1000}{S+10} \quad \text{SI (mm)} \quad CN = \frac{25.400}{S+254}$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad S = \frac{25.400}{CN} - 254$$

En los registros del S.C.S. de los Estados Unidos, se dan tablas completas de CN

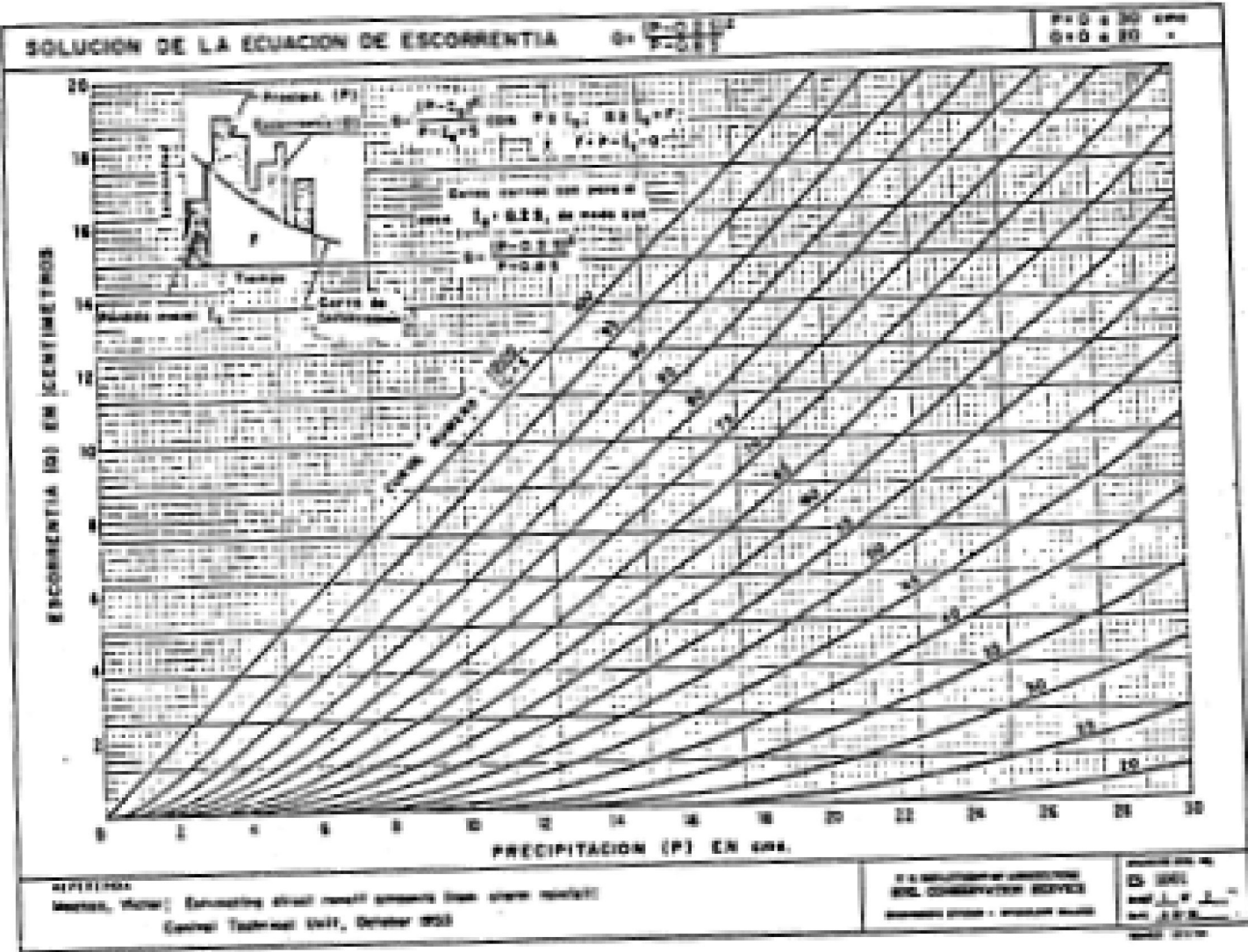
Uso de *S* y *CN*: Es más conveniente usar la CN en la tabla 6, pero será a veces necesario usar *S* en otras aplicaciones, tales como el análisis de los datos de escurrimiento para el desarrollo de relaciones suplementarias de escurrimiento. El ejemplo 3 ilustra sobre un uso típico de *S*, pero conviene agregar una escala de CN al gráfico, para facilitar la aplicación.

Tabla 6. Número de Curva (CN) y Constantes para el Caso $la = 0,2 S$

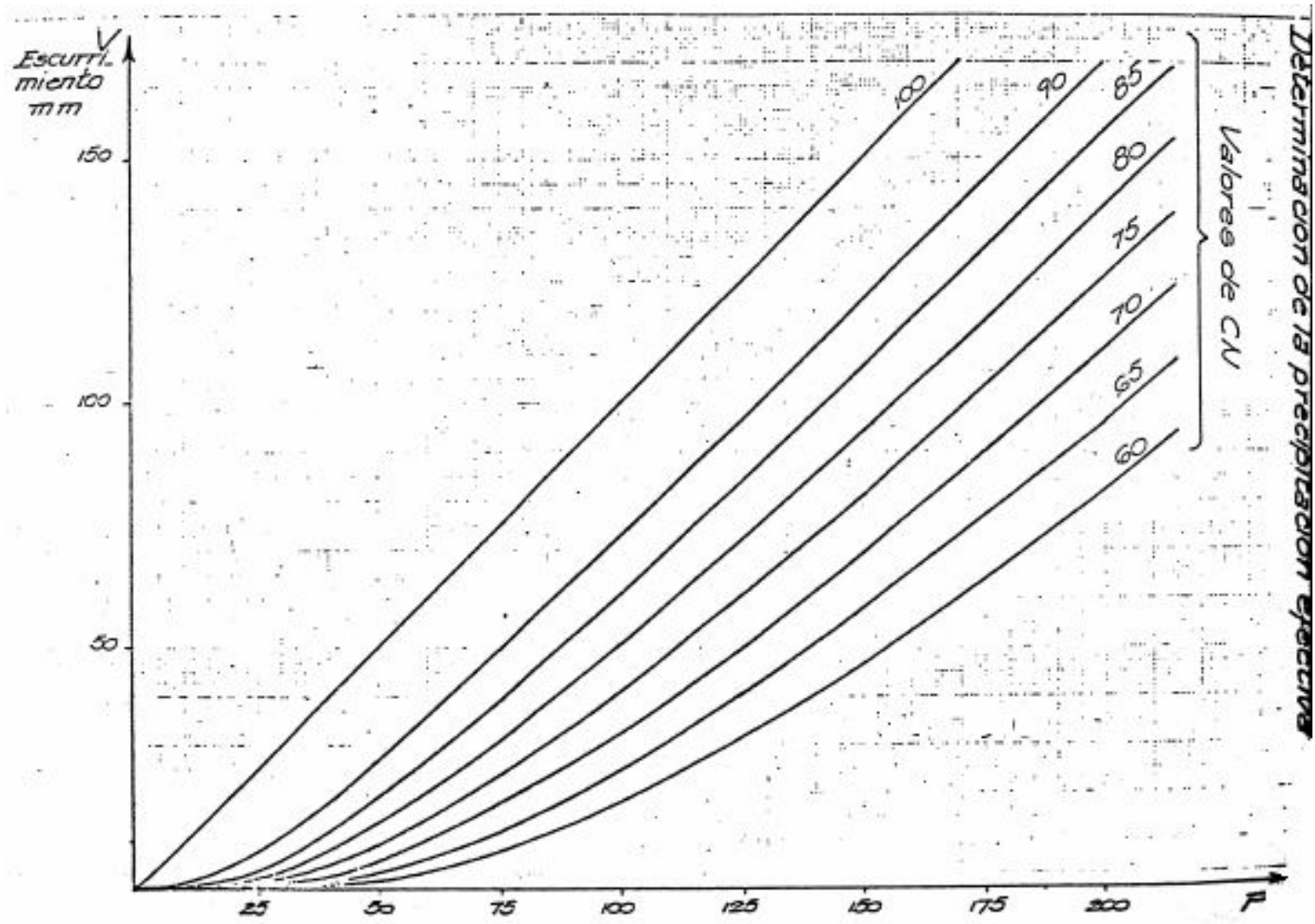
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
CN Para II	AWC I	III	Curva *		I	II	III	IV	V
			Valores	Gravidad					
			DE S *	Dónde P=					
		(pulg.)	(pulg.)			(pulg.)	(pulg.)		
100	100	100	0	0	60	40	78	6.67	1.33
99	97	100	.101	.02	59	39	77	6.95	1.39
98	94	99	.204	.04	58	38	76	7.24	1.43
97	91	99	.309	.06	57	37	75	7.54	1.51
96	89	99	.417	.08	56	36	75	7.86	1.57
95	87	98	.526	.11	55	35	74	8.18	1.64
94	85	98	.638	.13	54	34	73	8.52	1.70
93	83	98	.753	.15	53	33	72	8.87	1.77
92	81	97	.870	.17	52	32	71	9.23	1.85
91	80	97	.989	.20	51	31	70	9.61	1.92
90	78	96	1.11	.22	50	31	70	10.0	2.00
89	76	96	1.24	.25	49	30	69	10.4	2.08
88	75	95	1.36	.27	48	29	68	10.8	2.16
87	73	95	1.49	.30	47	28	67	11.3	2.26
86	72	94	1.63	.33	46	27	66	11.7	2.34
85	70	94	1.76	.35	45	26	65	12.2	2.44
84	68	93	1.90	.38	44	25	64	12.7	2.54
83	67	93	2.05	.41	43	25	63	13.2	2.64
82	66	92	2.20	.44	42	24	62	13.8	2.76
81	64	92	2.34	.47	41	23	61	14.4	2.88
80	63	91	2.50	.50	40	22	60	15.0	3.00
79	62	91	2.66	.53	39	21	59	15.6	3.12
78	60	90	2.82	.56	38	21	58	16.3	3.26
77	59	89	2.99	.60	37	20	57	17.0	3.40
76	58	89	3.16	.63	36	19	56	17.8	3.56
75	57	88	3.33	.67	35	18	55	18.6	3.72
74	55	88	3.51	.70	34	18	54	19.4	3.88
73	54	87	3.70	.74	33	17	53	20.3	4.06
72	53	86	3.89	.78	32	16	52	21.2	4.24
71	52	86	4.08	.82	31	16	51	22.2	4.44
70	51	85	4.28	.86	30	15	50	23.3	4.66
69	50	84	4.49	.90					
68	48	84	4.70	.94	25	12	45	30.0	6.00
67	47	83	4.92	.98	20	9	37	40.0	8.00
66	46	82	5.15	1.03	15	6	30	56.7	11.34
65	45	82	5.38	1.08	10	4	22	90.0	18.00
64	44	81	5.62	1.12	5	2	13	190.0	38.00
63	43	80	5.87	1.17	0	0	0	infinito	infinito
62	42	79	6.13	1.23					
61	41	78	6.39	1.28					

* para CN en la columna 1

Figura. 3. Solución de la Ecuación de Escorrentía



Determinación de la Precipitación Efectiva

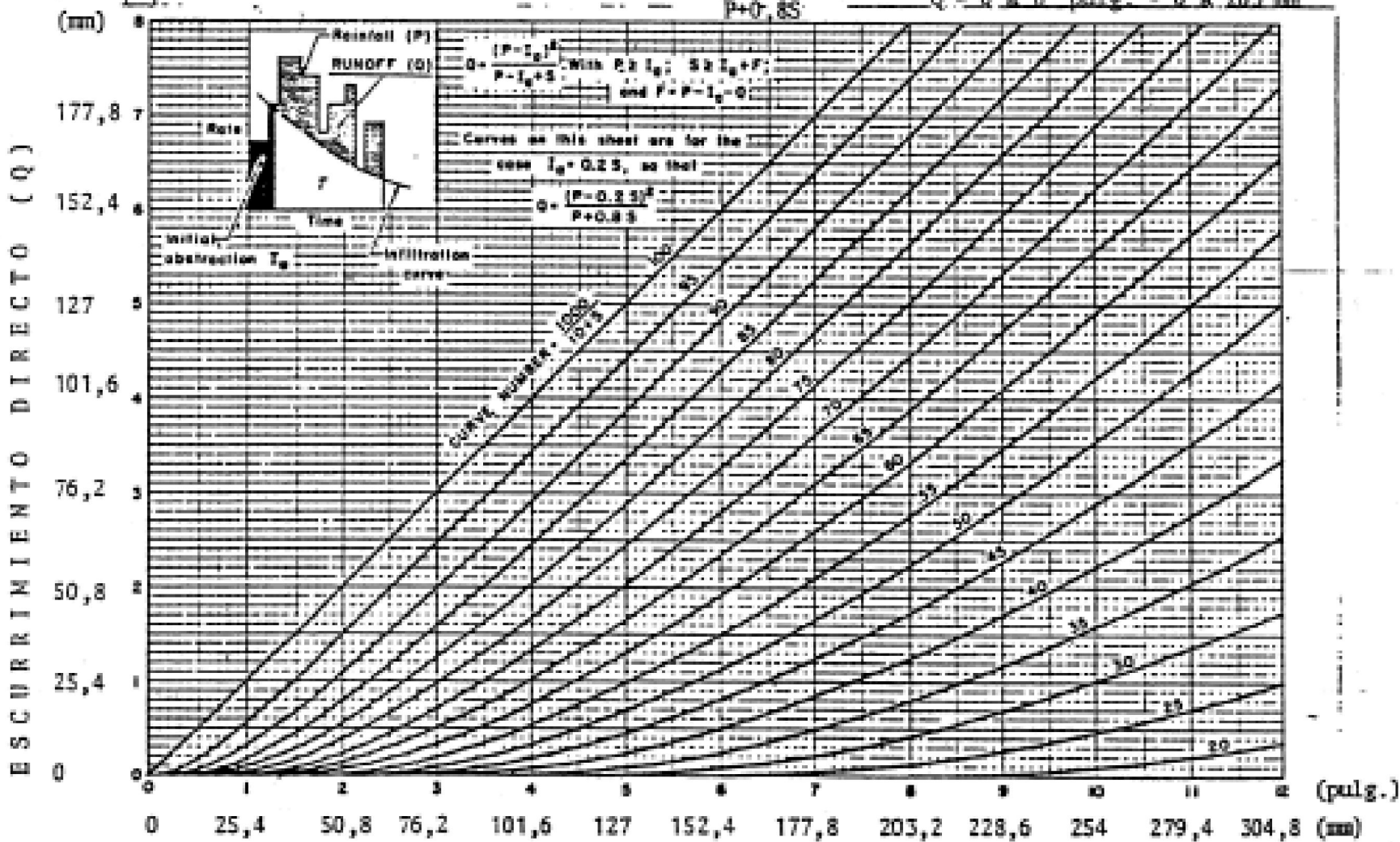


HIDROLOGIA: SOLUCIÓN DE LA ECUACION

$$Q = \frac{(P-0,25)}{P+0,85}$$

P = 0 a 12 pulg. - 0 a 305 mm

Q = 0 a 8 pulg. - 0 a 203 mm



SOLUCION DE LA ECUACION DE ESCURRIMIENTO $Q = \frac{(P-0,2S)^2}{(P+0,8S)}$

P= 8 a 40 pulg. - 203,2 a 1016
 Q= 0 a 40 pulg. - 0 a 1016

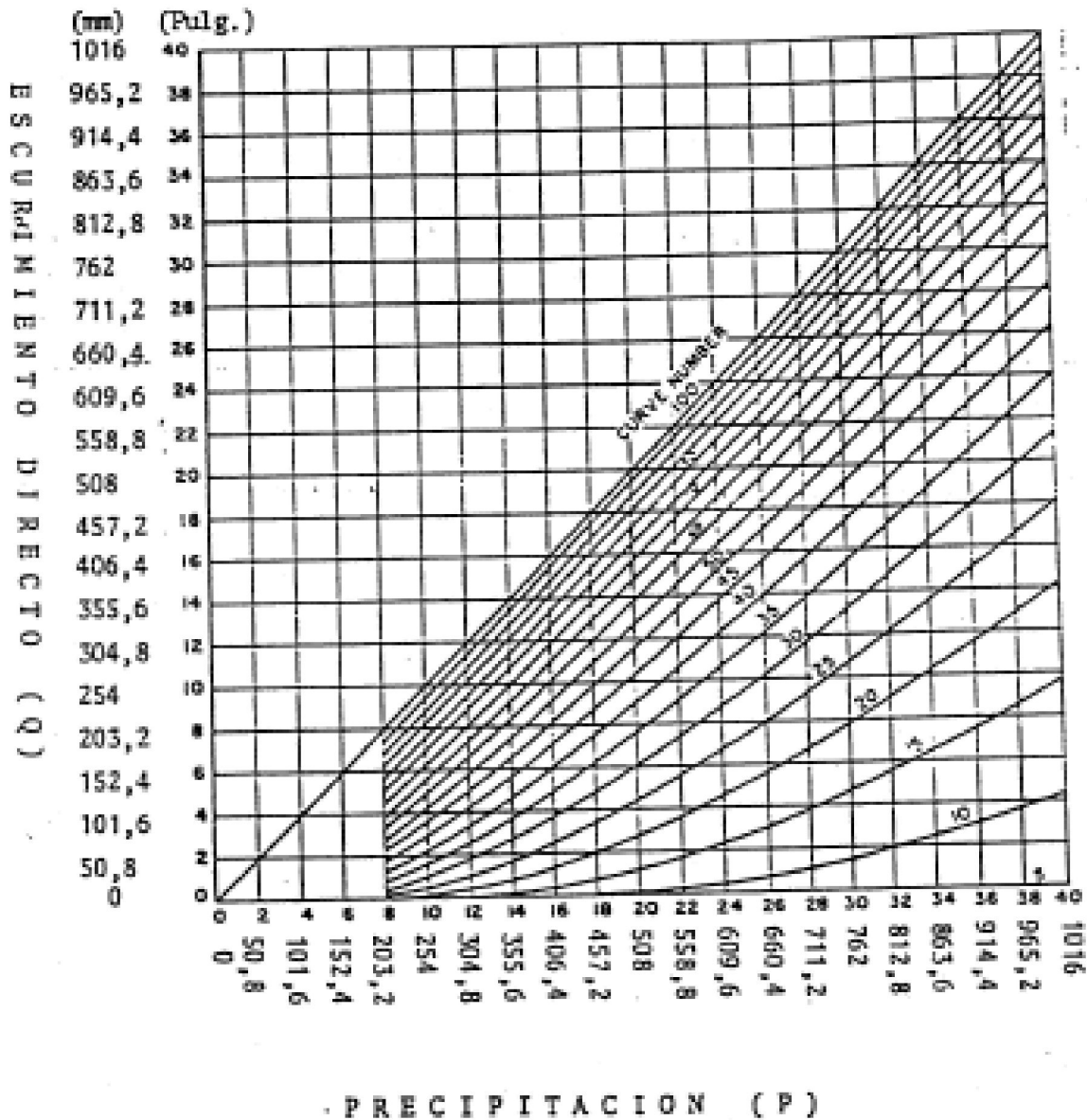
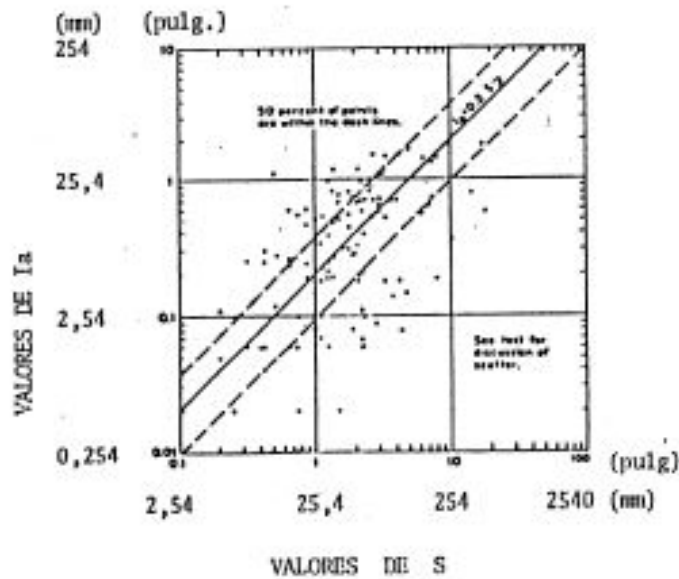


Figura 4. Relación entre I_a y S
Los Puntos Derivan de Información de Cuencas Experimentales



APLICACIONES Y EJEMPLOS.-

Los ejemplos en esta parte ilustran principalmente sobre el uso de las tablas 1, 3 y 6, y de la figura 3. En algunos ejemplos se usan los registros de cuencas aforadas para comparar escurrimiento real con escurrimiento calculado. Los errores en la estimación del escurrimiento se deben a una o más de las siguientes causas: Empirismo de la tabla 1 o figura 4, o tabla 3; de la relación entre AMC (columnas 1, 2 y 3 de la tabla 6) y errores en las determinaciones de promedio de precipitaciones en la cuenca; grupo de suelos; uso y tratamiento de suelos y cálculos relacionados.

Consecuentemente es imposible establecer un error standard de estimación para la ecuación de Q . Las comparaciones de escurrimientos reales y calculados indican solamente las sumas algebraicas de errores de varias fuentes.

Lluvias Individuales: El primer ejemplo es una típica aplicación de rutina del método de estimación cuando no hay interrogantes sobre la precisión de las determinaciones de lluvia, uso y tratamiento de suelos, y grupo de suelos.

Ejemplo 5: Llovió un promedio de 109,2 mm sobre una cuenca con una cubierta de pastura buena, suelos de grupo C y AMC-II. Estime el escurrimiento directo.

1. Determine el CN. En la tabla 3 en Pastura Buena y bajo grupo de suelo C lea una CN de 74, para una AMC-II.
2. Estime el escurrimiento. Entre en la figura 3 con lluvia de 109,2 mm y con CN 74 (por interpolación). Encuentre $Q = 46,48$ mm.

En la práctica, la estimación de Q lleva dos decimales para evitar confundir diferentes estimaciones. Excepto por ello, la estimación debería redondearse a un decimal. En el ejemplo 5 sería redondeada a 46,5 mm. Si la cantidad de lluvia no se conoce precisamente, la estimación se redondea aún más o se da el rango de estimación como en el ejemplo siguiente.

Ejemplo 6: Durante una tormenta eléctrica se midió una lluvia de 152,4 mm a 8 kilómetros del centro de una cuenca que tuvo una crecida. El área de drenaje de la cuenca es de 340 ha., la cubierta es una Pastura Media, los suelos están en el grupo D y se aplica una AMC-II. Estime el escurrimiento directo.

1. Determine la lluvia promedio sobre la cuenca. Entre en la figura 2 con una distancia de 8 km, y en la línea para una lluvia de 152,4 lea un error por exceso (positivo) de 71.1 mm. El error por defecto es la mitad del anterior, 35,5 mm. La cuenca es suficientemente chica como para que no sea necesaria ninguna corrección areal, por lo tanto la lluvia promedio en la cuenca oscila entre 223,5 y 116,8 mm.
2. Determine el CN. En la tabla 3.1 la CN es 84 para Pastura en condición Media en suelos del grupo D.
3. Estime el escurrimiento directo. Entre en la figura 3 con una lluvia de 223,5 mm y una CN = 84 (por interpolación). Lea un escurrimiento de 174,5 mm.; también entre con una lluvia de 116,8 mm. y lea un escurrimiento de 73,9 mm. Después de redondear, la estimación del escurrimiento directo se da entre 74 y 175 mm. El nivel de probabilidad de la figura 2 puede también ser usado con la estimación del escurrimiento.

La tabla 6 se usa cuando es necesario estimar el escurrimiento de una cuenca en condición seca o húmeda antes de una tormenta.

Ejemplo 7: Para la cuenca del ejemplo 5, estime el escurrimiento directo para AMC-I y AMC-III y compare con la estimación para AMC-II.

1. Determine la CN para AMC-II. Esto se hizo en el paso 1 del ejemplo 5, el CN es 74.
2. Determine la CN para otra AMC. Entre en la tabla 6 con CN = 74 en la columna 1 y en las columnas 2 y 3 lea CN = 55 para AMC-I y CN = 88 para AMC-III.
3. Estime los escurrimientos. Entre en la figura 3 con una lluvia de 109,2 mm. (del ejemplo. 5) y con CN 55, 74 y 88 lea (por interpolación si es necesario) Q = 16,51, 46,48, y 76,20 mm respectivamente. La comparación con AMC-II es como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Comparación de AMC, CN y Escurrimiento

AMC	CN	Escurrimiento Directo Q		
		mm	Como % de Lluvia	Como % de Q para AMC-II
I	55	16,51	15,1	35,6
II	74	46,48	42,5	100
III	88	76,20	69,8	164

Note que el escurrimiento en mm o en porcentaje no es directamente proporcional a la CN, de manera que el procedimiento no permite un atajo.

Métodos Alternativos de Estimación Para Complejos Múltiples: El escurrimiento directo para cuencas con más de un complejo suelo-cubierta puede ser estimado en dos formas: en el ejemplo 8, el escurrimiento, se estima para cada complejo y se pondera para obtener la estimación de cuenca. En el ejemplo 9 las CN son ponderadas para obtener un CN de la cuenca y el escurrimiento se estima usándolo.

Ejemplo 8: Una cuenca de 255 ha, de las cuales tiene 162 ha en cultivo en hilera, curvas de nivel, buena rotación y 93 ha en pradera de rotación, curvas de nivel, buena rotación. Todos los suelos están en el grupo D. Encuentre el escurrimiento directo para una lluvia de 129,5 mm, cuando la cuenca esta en AMC-II.

1. Determine la CN. La tabla 3 muestra que es 75 para cultivo en hileras y 69 para pradera.
2. Estime el escurrimiento para cada complejo. Entre en la figura 3 con una lluvia de 129,5 mm. y CN 75 y 69. Lea $Q = 64,01$ y $51,56$ mm. respectivamente.
3. Calcule el escurrimiento ponderado. La siguiente tabla 8, muestra el trabajo:

Tabla 8. Ecurrimiento Ponderado Respecto al Caudal

Complejo Hidrológico Suelo - Cubierta	CN	Ha	Q en mm	ha x Q
Cultivos en hileras	75	162	64,01	10.369
Pradera	69	93	51,56	4.795
Totales		255		15.164

4. El Caudal Q es: $15.164 / 255 = 59,47$ mm

Ejemplo 9: Use la información de cuenca y precipitación del ejemplo 8 y haga la estimación del escurrimiento usando un CN ponderado.

1. Determine la CN. La tabla 3 muestra que las CN son: 75 para cultivos en hileras y 69 para pradera.
2. Calcule la CN ponderada. La siguiente tabla 9 muestra el trabajo:

Tabla 9. Ecurrimiento Ponderado Respecto a la CN

Complejo Hidrológico Suelo - Cubierta	CN	Ha	Q en mm	ha x CN
Cultivos en hileras	75	162	64,01	12.150
Pradera	69	93	51,56	6.417
Totales		255		18.567

3. La CN ponderada es: $18.567 / 255 = 72,81$ use 73.
4. Estime el escurrimiento. Entre en la figura 3 con una lluvia de 129,5 mm. y una CN = 73 (por interpolación). Lea $Q = 59,94$ mm.

Sin el redondeo en el paso 2 del ejemplo anterior, ambos métodos de ponderación dan el mismo Q y no parece haber razón para preferir uno de los dos. Pero cada uno tiene sus ventajas y desventajas. El método del Q ponderado siempre da el Resultado Correcto (en base a la información dada), pero requiere más trabajo que el método de la CN ponderada, especialmente cuando una cuenca tiene muchos complejos.

El método del CN ponderado es más fácil de usar con muchos complejos o con una serie de lluvias, pero cuando hay grandes diferencias en la CN para una cuenca este método sub o sobre estimará el Q, dependiendo del tamaño de la lluvia.

Por ejemplo, una cuenca urbana con 8 ha de superficie impermeable (CN = 100) y 71 ha de prados, clasificados como Pastura Buena, en un suelo A (CN = 61), tendrá los siguientes Q por ambos métodos (en mm.), según la tabla 10.

Tabla 10. Comparaciones de Caudales

Precipitación	25,4	50,8	101,6	203,2	406,4	812,8
Q (método del Q ponderado)	2,54	6,86	28,96	99,31	275,59	662,94
Q (Método de la CN ponderada)	0	3,30	26,16	98,81	278,64	669,04

Esta comparación muestra, que el método del Q ponderado es preferible cuando se trabaja con lluvias pequeñas y hay; dos o más CN ampliamente diferentes en una cuenca, Para otras condiciones, el método de la CN ponderada es casi tan preciso y consume menos tiempo.

Bibliografía

- **Dastane, N.G.** 1974; Precipitación efectiva en la agricultura de regadío. FAO. Estudió sobre riego y avenamiento N° 25, 68 p
- **Evans, T.E.** 1971. Consultan`s reort in hydrology. Program UNEP - FAO. INTA. Argentina. 26. Part. I. Paraná.
- **FAO**, 1976. Precipitación efectiva. Roma – Italia.
- **FAO**, 1997. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. N.W. Hudson. Roma – Italia.
- **Hans Jenny**, 1994 (2005), Factors of Soil Formation, A System of Quantitative Pedology. Foreword by Ronald Amundson, RONALD AMUNDSON, University of California, Berkeley.
- **Murillo Illanes, M.** 2008. El Escurrimiento Superficial. Métodos para su Estimación en Conservación de Suelos, Manual Técnico, Universidad Católica Boliviana San Pablo, Unidad Académica Tiahuanaku, La Paz.
- **Murillo Illanes, M.** 2000. Estudio de las Características Hidrogeomórficas y Geoedáficas en Relación con los Caudales de Escurrimiento en la Subcuenca Berenguela, Bolivia. Universidad Nacional del Sur. Becario Gobierno Argentino programa MUTIS.
- **Murillo Illanes, M.** 2003. Estudio Geomorfológico y Edafológico de la Sub Cuenca Berenguela. MAGDER - La Paz.
- **Murillo Illanes, M.** 2007 y 2008. Curso Manejo Integral de Cuencas - Estudio de las Características Hidrogeomórficas, Topológicas y Geoedáficas en la Subcuenca Berenguela – Bolivia”. Documento de enseñanza de 275 páginas. Ingeniería Agronómica – Unidad Académica Campesina Tiahuanaku – Universidad Católica Boliviana “San Pablo”. La Paz - Bolivia.
- **Murillo Illanes, M.** 2003 La erosión y las Cuencas Hidrográficas, Misterio de Asuntos Campesinos Indígenas y Agropecuarios. La Paz - Bolivia.
- **Murillo Illanes, M.** 2003. Procesos Hidrológicos: Precipitación Efectiva y Volúmenes de Aporte en la Subcuenca Berengüela – Bolivia. Ministerio de Agricultura Ganadería y Desarrollo Rural. La Paz - Bolivia.
- **Rojas, Rafael M.** Drenaje Superficial de tierras agrícolas (CIDIAT)
- **Secretaria de Recursos Hidráulicos.** 1974; Elementos de escurrimiento Superficial, Memorandum técnico N° 330. 225 p. México.
- **Schwab, G.O., R.K. Frevert, T.Q. Edminster and K. K. Barnes.** 1981; Soil and Water Conservation Engineering. J. Wiley (3° ed.) New York.
- **Soil Conservation Service.** 1953; Engineering Handbook for Farm Planners; Upper Mississippi Valey Region. III. EE.UU.
- **Soil Conservation Service**, National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology. NEH - Notice 4-102 August 1972.
- **U.S.B.R.** Diseño de Presas Pequeñas.
- **USDA, SCS.** 1964. Hydrology Section 4, Part. I, Watersehd Planning. National Engineering Handbook, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Washington DC.
- **USDA.SCS.** 1986. Urban Hydrology for Small Watersheds, tehcnical release 55, Soil Conservation Service, Dep. Of Agriculture. Washington D.C.
- **USDA**, 1967. Diseño de Pequeñas Presas. United States Department of the Interior. Bureau of Reclamation. Compañía Editorial Continental, S.S. México 22 D.F. 125 – 445 pp.
- **USDA**, 1973. Design of Small Dams. 2° Ed., Washington DC. 67 – 71 pp.
- **US Army Corps of Engineers.** 2000. Hydrologic Modeling System. Technical manual reference. Hydrologic Engineering Center. Davis, CA 95616 – 4687 USA. 145 pp.
- ---- National Engineering Handbook. 1964, Section 4. Hydrology Part I. Watershed planning. EE.UU
- --- A method for estimating volume and rate of runoff in small watersheds. SCS-TP-149. 19 pp. EE.UU.
- --- Engineering field manual for conservation practices. 1975; Chapter 2: Estimating runoff. EE.UU.

mgmi, La Paz . Invierno del 2010.