

A N E X O D

ESTUDIOS HIDROLOGICOS DE LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO REVENTADO

C O N T E N I D O

	<u>Página</u>
1.- INTRODUCCION	235
2.- EXPLICACION HIDROLOGICA DEL PROBLEMA DEL RIO REVENTADO	235
3.- INFORMACION DISPONIBLE SOBRE PRECIPITACION Y ANALISIS DE LA MISMA	236
3.1 Estimación de la Precipitación Promedio Mensual y Anual, sobre la Cuenca Superior del Río Reventado	233
3.2 Precipitación de los Años 1963, 1964, 1965 en Sanatorio Durán Comparada con el Promedio del Registro.	239
3.3 Estimación de la Tormenta de Diseño para el Río Reventado.	240
3.4 Estimación de los Volúmenes de Agua Precipitada Sobre la Cuenca Superior del Río Reventado Durante las Últimas Avenidas de los Años 1964 y 1965.	246
4.- INFORMACION DISPONIBLE SOBRE NIVELES Y CAUDALES Y ANALISIS DE LA MISMA	243
4.1 Caudales en el Puesto 2	249
5.- INFORMACION DISPONIBLE SOBRE SEDIMENTOS Y ANALISIS DE LA MISMA.	252

LISTA DE LAMINAS

- D-1 Precipitación Mensual Acumulada en la Estación de Sanatorio Durán (años 1944, 1953, 1963, 1964 y 1965).
- D-2 Relación entre Intensidad, Duración y Frecuencia de Lluvia en la Estación Pacayas.
- D-3 Gráfico para encontrar la Relación entre A y T en la ecuación $A = C T^m$ en la Estación de Pacayas.
- D-4 Curvas de Intensidad - Duración para Cuenca Superior del Río Reventado.
- D-5 Algunas de las Principales Tormentas y Avenidas ocurridas en la Cuenca Superior del Río Reventado (Años 1964 - 1965).

ESTUDIOS HIDROLOGICOS DE LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO REVENTADO

1.- INTRODUCCION

El presente anexo resume los estudios hidrológicos realizados en la cuenca superior del Reventado, los cuales se llevaron a cabo con el objeto de aportar datos básicos para la búsqueda de una solución al problema que el mencionado río causa a la ciudad de Cartago. Estos estudios son de importancia fundamental, pues ya ha sido aceptado - que el desbalance hidrológico causado por la precipitación de ceniza volcánica sobre la Cuenca Superior del Reventado, es el responsable de la ocurrencia de frecuentes avenidas de altos caudales picos los cuales han puesto en peligro desde mayo de 1963 hasta la fecha (julio de 1965), a parte de la ciudad de Cartago.

2.- EXPLICACION HIDROLOGICA DEL PROBLEMA DEL RIO REVENTADO

Desde el punto de vista hidrológico, el problema del Río Reventado se puede explicar por un aumento desproporcionado de la escorrentía superficial y una disminución notable en el tiempo de concentración de la cuenca, todo esto a causa de la destrucción de la cobertura vegetal y a la formación de una capa casi impermeable de ceniza, en la Cuenca Superior del Río Reventado. Es decir, las pérdidas por -intercepción prácticamente desaparecieron al perecer la vegetación, e igualmente las pérdidas por infiltración, no sólo por la impermeabilidad de la capa superior de la ceniza, sino también por la desaparición de las plantas, las cuales favorecían la infiltración con sus raíces; al mismo tiempo, al no haber vegetación el agua escurre libremente por las laderas sin que ningún obstáculo se oponga a su

paso, acortándose de este modo el tiempo de concentración.

Dada la escasa importancia del Río Reventado antes de la presente emergencia, no se tienen datos que permitan conocer su comportamiento hidrológico previo a la precipitación de ceniza, pero los datos obtenidos posteriormente permiten estimar que para toda la Cuenca Superior, el tiempo de concentración debe haberse reducido por lo menos en un 50 por ciento, siendo actualmente del orden de los 22 minutos. Como las avenidas transportan gran cantidad de material incluyendo piedras, palos, grava, arena y limo lo que dificulta de sobremanera las mediciones adecuadas de nivel y caudal, unido a las características de las tormentas que ocurren sobre el área (núcleos de lluvia de alta intensidad, aislados y relativamente estáticos, generalmente cerca de las cabeceras del río), no ha sido posible la determinación del coeficiente de escorrentía; sin embargo, estimaciones de campo, que parecen confirmarse con el comportamiento de la cuenca, permiten estimar este valor entre 65 y 95 por ciento.

Se tiene el proyecto de llevar a cabo estudios más completos, para lo cual se ha iniciado ya una mejora en la red de estaciones medidoras de lluvia, la cual tendría por objeto el establecimiento de las relaciones entre precipitación, escorrentía y pérdidas, lo que permitiría ir evaluando la efectividad de las medidas que se están llevando a cabo para el restablecimiento del balance hidrológico en la Cuenca Superior del Reventado.

3.- INFORMACION DISPONIBLE SOBRE PRECIPITACION Y ANALISIS DE LA MISMA

Dada la relativa poca importancia de la Cuenca del Reventado desde el punto de vista de recursos hidráulicos, no existían en ella antes de

la presente emergencia estaciones medidoras de lluvia ni de caudal. Las estaciones medidoras de lluvia más próximas eran: Sanatorio Durán, muy cerca del extremo sur este de la Cuenca Superior, a una elevación de 2337 m.s.n.m., con 21 años y 7 meses de lecturas diarias, y un año y 3 meses de registro gráfico; y Pacayas, situada a 9 Km. al este del borde oriental de la cuenca superior, a una elevación de 1735 m.s.n.m. con 10 años de registro gráfico.

En vista de la escasez de datos pluviométricos, y su importancia en el problema actual, se procedió a instalar una red lo suficientemente adecuada para:

- a) Recoger datos para el sistema de alertas,
- b) Recoger datos básicos para el estudio de posibles soluciones

En total se instalaron veinte nuevas estaciones, para totalizar veintitrés con las que estaban en operación, de las cuales ocho son pluviográficas y quince pluviométricas. Quedó así cubierta la cuenca del Reventado de estaciones pluviométricas, y en menor grado las cuencas vecinas, que habían resultado afectadas también por la precipitación de la ceniza volcánica.

En la lámina 4 se muestra la ubicación de estas estaciones, cuya lista aparece en la Tabla 3-2 del informe.

En todos los puestos de vigilancia de los ríos y en el del Volcán, se tienen pluviómetros de reglilla; cuando ocurre una tormenta importante, el personal destacado en los mismos, realiza lecturas de la precipitación acumulada cada cinco o diez minutos, obteniendo de esta manera datos muy adecuados que permiten la determinación de las intensidades de lluvia, tanto para el establecimiento de las alertas, tal como

se explicó en el párrafo 4.1 del texto, como para su posterior análisis en el estudio de las tormentas.

3.1 Estimación de la Precipitación Promedio Mensual y Anual sobre la Cuenca Superior del Río Reventado

Haciendo uso de las correlaciones entre los datos de precipitación de las estaciones nuevas ubicadas dentro de la cuenca superior del Río Reventado y los registros de Sanatorio Durán, usando el método de la curva doble de masa, se estimó la precipitación promedio mensual y anual sobre la cuenca superior, cuyos valores se suministran en la Tabla D-1 y se representa gráficamente (isoyetas e histograma) en la lámina 18.

TABLA D-1

PRECIPITACION PROMEDIO MENSUAL (*) SOBRE LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO REVENTADO

Mes	Milímetros de lluvia	% del Total Anual
Enero	39	2.4
Febrero	17	1.1
Marzo	7	0.4
Abril	28	1.8
Mayo	202	12.6

(Continúa)

(*) Nota: Obtenida por correlación entre las estaciones de Chicoa, Laguna, Puesto 3, Puesto 2, Retes 1, Cañada, con la precipitación en Sanatorio Durán - (21 años, 7 meses de registro).

(Continuación Tabla D-1)

Mes	Milímetros de lluvia	% del Total Anual
Junio	231	14.4
Julio	145	9.1
Agosto	142	8.9
Setiembre	216	13.5
Octubre	302	19.2
Noviembre	174	10.9
Diciembre	91	5.7
TOTALES	1,600 mm.	100 %

3.2 Precipitación de los Años 1963, 1964, 1965 en Sanatorio Durán Com-
parada con el Promedio del Registro

De los datos de lluvia registrada en el Sanatorio Durán, se obtu-
vieron curvas acumulativas de precipitación mensual de los años -
1963, 1964 y 1965 y del promedio del registro; estas curvas se -
muestran en la lámina D-1.

Del estudio de estas curvas se llega a la conclusión de que el a-
ño 1963, fue un año con precipitación inferior a la normal, hecho
que se manifestó en el número de avenidas de importancia, pues só
lo se presentaron doce de importancia incluyendo la del 9 de di -
ciembre, que es la más grande observada en el puesto 2 en lo que va
de la presente emergencia. El año 1964 mostró una tendencia a es
tar ligeramente sobre el año promedio en los meses más lluviosos,
habiéndose presentado dieciocho avenidas de importancia. En cam-
bio el año 1965, hasta el mes de julio, está bajo la curva prome-

dio; sin embargo, entre mayo y junio se presentaron un total de diecisiete avenidas con niveles picos entre 0.9 y los 10.6 metros (Ver Tabla A-1, Anexo A) aunque de relativa corta duración, y por consiguiente de poco volumen.

En la Tabla D-2, se suministran los datos de la precipitación mensual, observada en las estaciones que se instalaron con motivo de la emergencia provocada por el Volcán Irazú. Aunque el registro es de muy corta duración, se puede observar que los meses de mayo, junio, setiembre y octubre son generalmente los más lluviosos en toda el área de emergencia, cosa que se corrobora con el estudio de la precipitación media mensual en la estación del Sanatorio Durán, que aparece en la Tabla D-3.

3.3 Estimación de la Tormenta de Diseño para el Río Reventado

Como se ha explicado anteriormente, antes del inicio de la presente emergencia, no existían dentro de la cuenca del Río Reventado ninguna estación medidora de lluvia. Los datos pluviográficos más cercanos y de mayor duración (10 años), se han obtenido en la estación de Pacayas, localizada 9 kilómetros al este del borde oriental de la cuenca bajo estudio.

NOTAS

- 1) Los datos fueron suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional
- 2) Promedio anual es de 1456.6 mm y cubre el periodo comprendido entre el 1^o de enero de 1943 y el 30 de noviembre de 1964 (22 años)

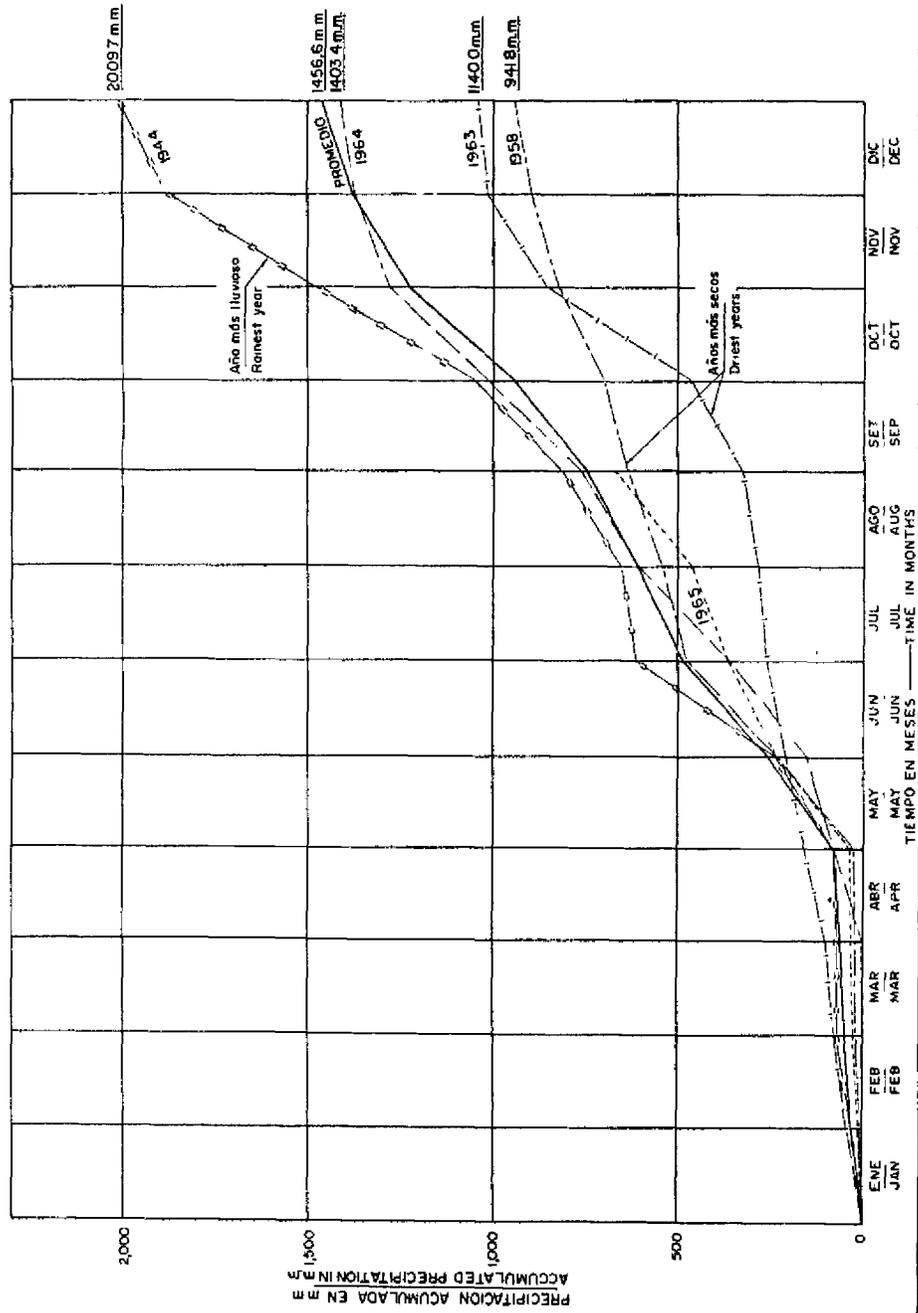
NOTES

- 1) Data supplied by the Servicio Meteorológico Nacional
- 2) Average annual precipitation for the period January 1st 1943 to November 30th, 1964 (22 years) = 1456.6 mm

SIMBOLOS — SYMBOLS

—	1944
- - -	1958
- - -	1963
- - -	1964
- - -	1965

Promedio de 22 años de registro
Average for 22 years of records.



INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
DIVISION DE DESARROLLO
OFICINA DE CONTROL DE RIOS
PRECIPITACION MENSUAL ACUMULADA
EN LA ESTACION DE SANATORIO
DURAN (AÑOS 1944, 1958, 1963, 1964, 1965)
ACCUMULATED MONTHLY PRECIPITATION
AT THE SANATORIO DURAN
STATION (YEARS 1944, 1958, 1963, 1964, 1965)
6-SET-1964 36-3-540

T A B L A D-2

LLUVIA MENSUAL EN LAS ESTACIONES INSTALADAS CON MOTIVO DE LA EMERGENCIA DEL VOLCAN IRAZU

(Totales mensuales en milímetros)

ESTACION	1 9 6 4												1 9 6 5				
	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.				
Puesto 1	233.3	490.1	243.6	403.7	314.4	65.5	21.2	6.3	18.6	2.8	0.5	246.2	245.2				
Puesto 2	150.0	208.7	144.4	258.4	289.8	85.2	16.2	8.7	12.2	0.4	0.5	204.8	148.3				
Puesto 3	200.0	237.1	142.3	253.0	303.5	78.0	27.6	10.8	16.1	3.0	1.5	199.1	140.8				
Puesto 4	216.2	248.9	163.1	210.3	271.5	127.8	56.7	140.9	72.3	36.8	3.1	245.0	148.9				
Puesto 5	-	489.4	183.2	484.0	266.7	66.8	35.0	22.7	30.9	19.7	0.0	259.3	241.0				
Puesto 6	-	-	-	-	-	115.5	26.4	81.0	73.4	35.3	4.5	220.4	359.0				
Puesto 8	-	-	-	-	-	45.2	7.7	13.4	2.8	0.1	0.0	253.7	321.5				
Puesto 9	-	-	-	-	-	75.8	14.4	34.6	20.4	7.6	0.0	183.2	154.7				
Puesto 10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	155.8				
Retes	-	-	-	-	-	122.7	46.8	296.1	177.3	292.6	10.0	240.9	269.8				
Casa Retes	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	168.2				
Banderilla	-	-	-	293.0	353.6	96.5	14.7	Trasladada a puesto 9 partir del 2-1-65									
Quircot	-	-	-	-	214.6	7.0	20.6	Retirada el 31-12-64									
Chicua	-	-	-	291.2	259.6	121.7	62.3	64.7	48.5	23.3	5.1	235.7	194.8				
Cañada	-	-	-	382.8	304.5	89.8	24.3	23.0	N.D.	11.8	227.2	Retirada 31-4-65					
Laguna	-	-	-	227.4	246.6	103.5	36.4	52.4	43.8	17.1	2.0	278.6	181.9				
Tierra Blanca	-	-	-	216.8	296.6	89.3	29.3	17.9	13.6	8.9	1.8	193.3	128.4				
Llano Grande	-	-	-	306.5	356.4	112.5	8.9	8.0	6.3	0.0	0.0	244.4	200.8				
Cot	-	-	36.7	192.9	290.0	83.1	64.4	136.4	67.2	0.0	1.0	Retirada 11-5-65					

Notas: 1) Para ubicación, equipo usado y fecha de instalación véase Tabla 3-2

2) N.D.= No hay datos

3) Los puestos 2, 3 y 4 tienen datos de lluvia desde el mes de abril de 1964.

4) Véase la ubicación de estas estaciones en lámina 4.

TABLA D-3

PRECIPITACION MEDIA MENSUAL EN LA ESTACION DE SANATORIO
DURAN (CON 22 AÑOS DE REGISTRO)

Mes	Precipitación Media Mensual	% del Total Anual
ENERO	35.7	2.4
FEBRERO	15.8	1.1
MARZO	6.5	0.4
ABRIL	25.9	1.8
MAYO	183.6	12.6
JUNIO	210.2	14.4
JULIO	131.7	9.0
AGOSTO	129.7	8.9
SEPTIEMBRE	196.5	13.5
OCTUBRE	280.9	19.3
NOVIEMBRE	158.2	10.9
DICIEMBRE	22.8	5.7
ANUAL	1,457.5	100.0

NOTA: Datos suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional

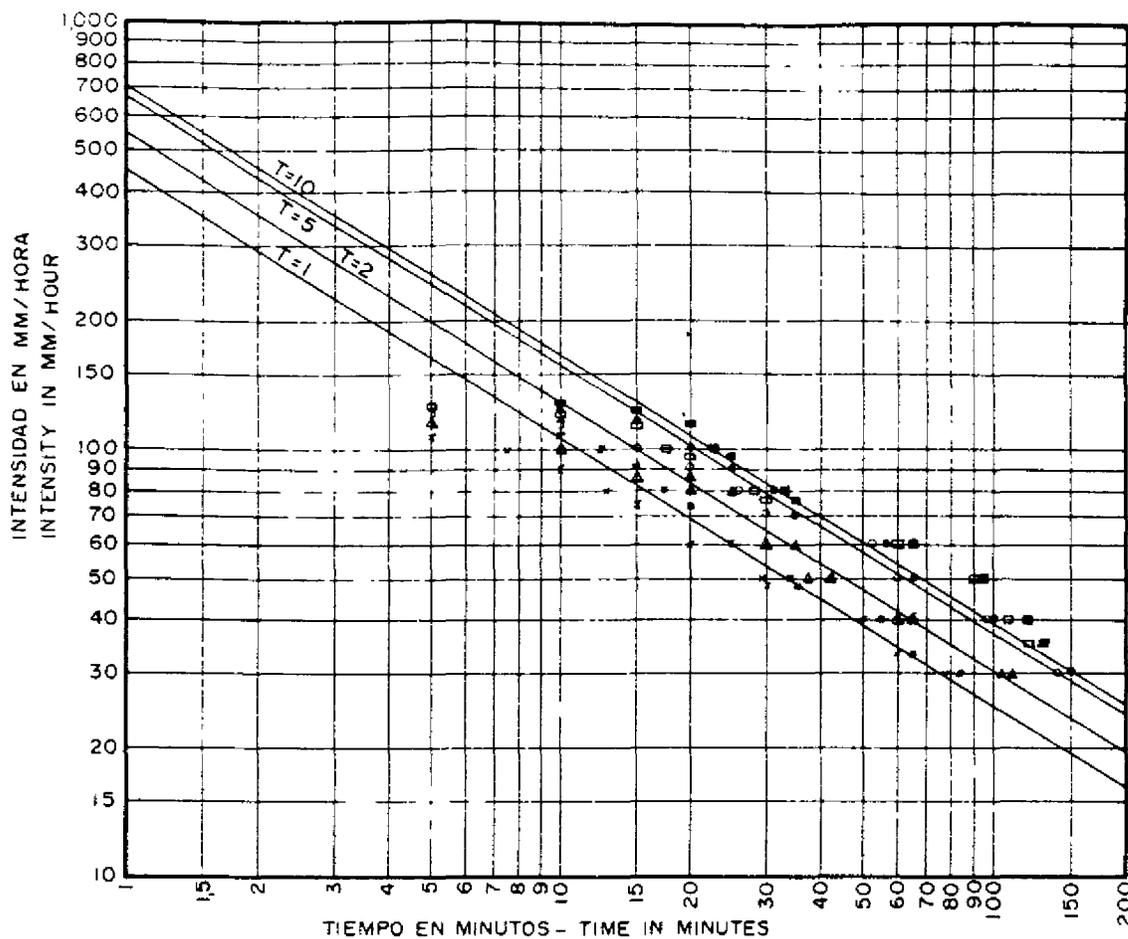
Haciendo un estudio estadístico de las tormentas más intensas ocurridas en Pacayas durante los diez años de registro gráfico, se obtuvo la Tabla D-4. De esta Tabla es posible establecer las relaciones entre intensidad y duración, que tuvieron las tormentas de un período de recurrencia de una vez en un año (10 veces en 10 años), una vez en dos años (5 veces en 10 años), una vez en cinco años (2 veces en 10 años), etc. Obtenidas las relaciones entre intensidad (i) y duración (t) para las tormentas de los diferentes períodos de recurrencia, las mismas se representan gráficamente en papel logarítmico, en las abscisas (t + d) y en las ordenadas las respectivas intensidades (i). El valor de "d" se escoge de tal manera que los puntos definan una línea recta sobre el papel logarítmico. Del gráfico anterior se determinan ecuaciones de la forma:

$$i = \frac{A}{(t+d)^n} \quad (a)$$

para cada uno de los períodos de recurrencia, las cuales definen esencialmente paralelas en el papel logarítmico (ver lámina D-2).

Finalmente, existe una relación entre los valores del período de recurrencia (T) y de la constante A, la cual es obtenida de representar valores de T contra A en un papel logarítmico, las cuales definen una línea recta. (Ver lámina D-3). Se obtiene de esta manera, una ecuación de la forma $A = C T^m$, y que en el caso de Pacayas es:

$$A = 450 T^{.239} \quad (b)$$



SÍMBOLOS
SYMBOLS

FRECUENCIA (T)	POSICION DE PLOTEO ACTUAL	POSICION AJUSTADA 5 minutos a la derecha
FREQUENCY (T)	ACTUAL PLOT POSITION	ADJUSTED POSITION 5 minutes to right
1	x	*
2	△	▲
5	○	●
10	□	■

NOTA

Este estudio se basó en diez años de registros del pluviógrafo de Pacayas del Servicio Meteorológico Nacional

NOTE

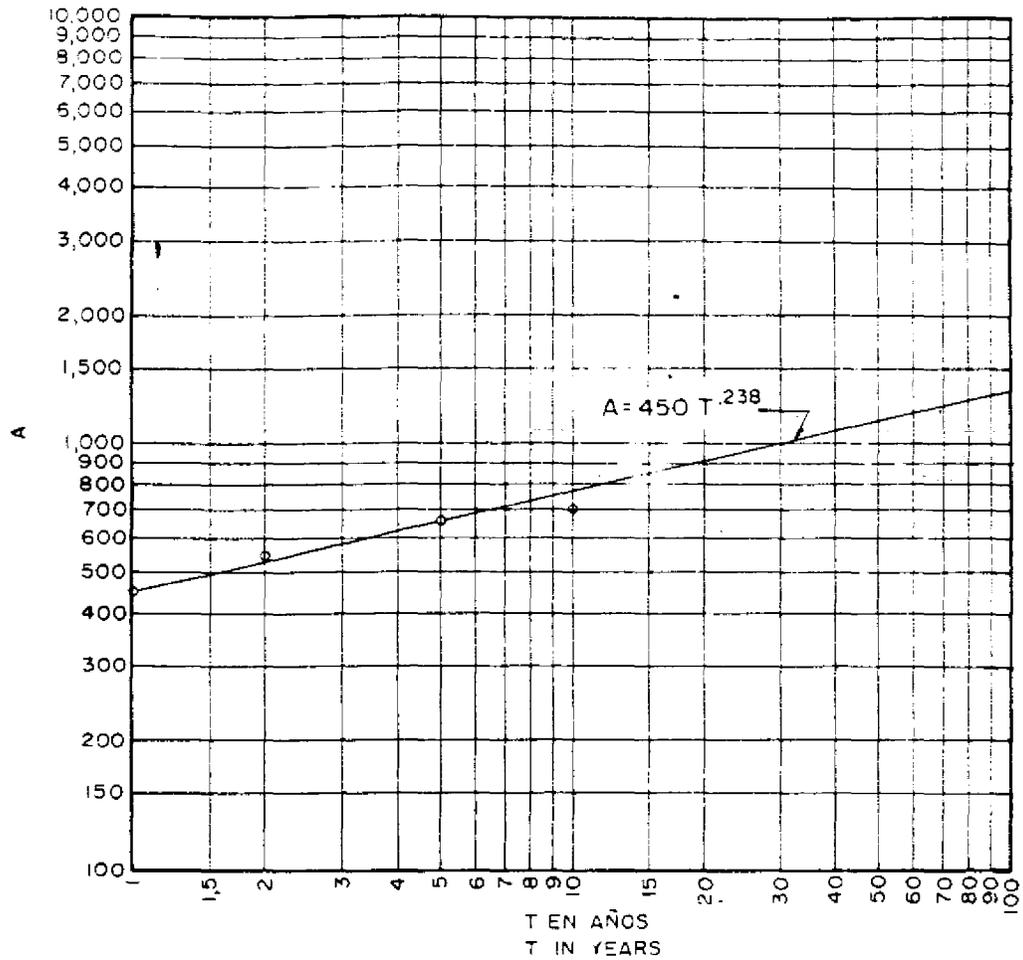
This study is based on ten years of automatic rainfall records at Pacayas Station of the Servicio Meteorológico Nacional

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
DIVISION DE DESARROLLO
OFICINA DE CONTROL DE RIOS
ESTUDIO DEL RIO REVENTADO
RELACION ENTRE INTENSIDAD, DURACION
Y FRECUENCIA DE LLUVIA EN LA
ESTACION DE PACAYAS
STUDY OF THE REVENTADO RIVER
RELATIONSHIP BETWEEN INTENSITY, DU-
RATION AND FREQUENCY OF RAINFALL
AT PACAYAS STATION

ABR 2-1965

ESCALAS IND

36-1-1,707



NOTA

Este estudio se basó en diez años de registros del pluviógrafo de Pacayas del Servicio Meteorológico Nacional.

NOTE:

This study is based on ten years of automatic rainfall records at Pacayas Station of the Servicio Meteorológico Nacional.

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
 DIVISION DE DESARROLLO
 OFICINA DE CONTROL DE RIOS
 ESTUDIO DEL RIO REVENTADO
 GRAFICO PARA ENCONTRAR LA RELACION
 ENTRE A Y T EN LA ECUACION $A = CT^m$
 ESTACION DE PACAYAS
 STUDY OF THE REVENTADO RIVER
 GRAPHIC FOR DETERMINING THE RELATION
 BETWEEN A AND T IN THE EQUATION $A = CT^m$
 PACAYAS STATION

Reemplazando este valor de "A" en la ecuación (a), se llega a:

$$i = \frac{450 T^{.238}}{(t + 5)^{.623}} \quad (c)$$

Que es la ecuación que liga la intensidad (i en mm/hora), la duración de la lluvia (t en minutos) y el período de recurrencia (T en años), - en la Estación de Pacayas.

Aunque en general, en Pacayas llueve anualmente más que en la Cuenca Superior del Río Reventado (Pacayas 2010 mm/año, Sanatorio Durán, 1483 mm/año), su relativa proximidad a la cuenca (9 Km) permite suponer - que una tormenta intensa sobre Pacayas podría desplazarse fácilmente - hasta cubrir la Cuenca Superior del Río Reventado. Esto parece ser lo que ocurrió el 9 de diciembre de 1963 (Ver lámina 8), cuando un disturbio atmosférico proveniente del Caribe, produjo fuertes aguaceros en - toda la vertiente Atlántica de la República de Costa Rica, causando a-venidas de importancia en muchos ríos, pero siendo de graves consecuencias en el Río Reventado, cuya Cuenca Superior ya estaba cubierta de - ceniza volcánica (Ver Anexo A).

De lo anteriormente expuesto se concluye que se puede usar la relación "Intensidad duración-período de recurrencia" dada por la fórmula (c), - para la Cuenca Superior del Río Reventado. En la lámina D-4, aparece la representación de dicha fórmula para diferentes valores de T.

Tomando en cuenta la importancia y costo de las obras propuestas para estabilizar los cauces de la Cuenca Superior, se recomienda considerar un período de recurrencia (T) no menor de 50 años, para determinar la tormenta de diseño de estas obras. En el párrafo 3.5 del informe se

Calculó la avenida de diseño con base en la tormenta de $T = 50$ años de Pacayas.

3.4 Estimación de los Volúmenes de Agua Precipitada sobre la Cuenca Superior del Río Reventado Durante las Últimas Avenidas de los Años 1964 y 1965

Durante el mes de agosto de 1964, al ser encargado el I.C.E. de buscar una solución al problema del Río Reventado se inició la instalación de las estaciones medidoras de lluvia adicionales a las localizadas en los puestos, en la Cuenca Superior del Río Reventado. Por lo tanto de las tormentas que ocurrieron con posterioridad a esa fecha, se tienen datos suficientes para determinar, en forma estimativa, el volumen de agua precipitada. El tipo de tormentas que se desarrolla sobre el área, de acuerdo con las observaciones del radar meteorológico, se caracteriza por la formación de núcleos aislados y bastante estacionarios, y su localización generalmente muy cerca del borde norte de la Cuenca Superior. Este hecho, unido a lo escabroso del terreno, indican la necesidad de incrementar el número de estaciones medidoras de lluvia y de localizar algunas en el borde mismo de la cuenca Superior. Al escribir este informe (julio de 1965), se realizan esfuerzos para mejorar la red pluviométrica en la forma indicada anteriormente, a pesar de lo inaccesible de la mayoría de los sitios.

Tomando en cuenta las limitaciones anotadas, se obtuvieron isoyetas de las últimas y principales tormentas del año 1964, y en las mayores ocurridas en lo que va del año 1965. De estas iso-

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
 DIVISION DE DESARROLLO
 OFICINA DE CONTROL DE RIOS
 ESTUDIO DEL RIO REVENTADO
 CURVAS DE INTENSIDAD - DURACION PARA
 LA CUENCA SUPERIOR DEL
 RIO REVENTADO
 STUDY OF THE REVENTADO RIVER
 CURVES OF INTENSITY - DURATION
 FOR THE REVENTADO RIVER
 UPPER BASIN

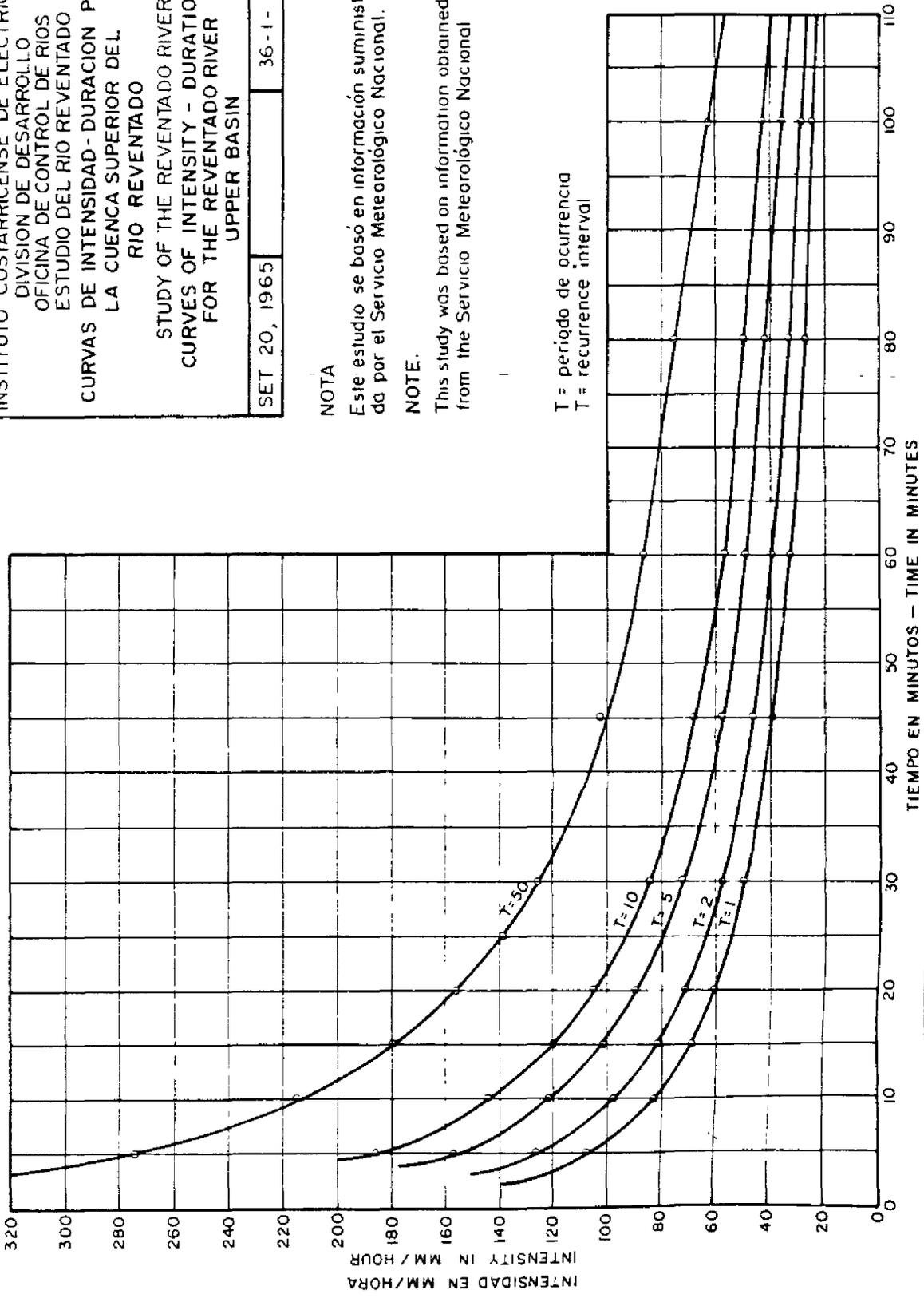
SET 20, 1965 36-1-1760

NOTA

Este estudio se basó en información suministrada por el Servicio Meteorológico Nacional.

NOTE.

This study was based on information obtained from the Servicio Meteorológico Nacional



T = período de ocurrencia
 T = recurrence interval

yetas, que aparecen en la lámina D-5 se obtuvieron los volúmenes precipitados, cuyos valores se suministran en la Tabla D-5

TABLA D-5

VOLUMENES PRECIPITADOS DURANTE ALGUNAS TORMENTAS DE LOS
AÑOS 1964 y 1965 SOBRE LA CUENCA SUPERIOR DEL
RIO REVENTADO

<u>Fecha de la tormenta</u>	<u>Volumen precipitado</u> <u>miles de m³</u>
2 de setiembre de 1964	726
8 de setiembre de 1964	642
25 de setiembre de 1964	62
23 de octubre de 1964	670
2 de noviembre de 1964	684
25 de mayo de 1965	155
26 de mayo de 1965	388
4 de junio de 1965	78
11 de junio de 1965	127
12 de junio de 1965	338

4.- INFORMACION DISPONIBLE SOBRE NIVELES Y CAUDALES Y ANALISIS DE LA MISMA

Como se explicó en el párrafo 3.3 del informe, los únicos datos disponibles sobre niveles en el Río Reventado, provienen de las lecturas de escala que realizan los Guardias Civiles, destacados en la zona de emergencia del Irazú. Estas lecturas se hacían anteriormente sobre marcas pintadas en las paredes del cauce de los ríos o en bastión del puente (caso del puesto 2). En la actualidad esas mediciones se efectúan en el puesto 2, 3 y 10 por medio de un medidor de cable y contrapeso, que es capaz de determinar el nivel del río, en una sección escogida. El cable del contrapeso se desliza por una rondana, la cual pende de un cable de soporte anclado en ambas orillas de la sección de medida. El torno que opera el contrapeso se haya convenientemente dispuesto de manera que los observadores pueden ver el río en todos los niveles, desde un lugar seguro. El equipo usado cuenta con un dispositivo electrónico, el cual hace brillar un pequeño bulbo eléctrico, cuando el contrapeso hace contacto con la superficie del agua, facilitando de esta manera las determinaciones de nivel, especialmente las realizadas durante la noche. En general puede decirse, que, a partir del mes de julio de 1965 inclusive, se cuenta con datos más exactos de nivel en los puestos 2, 3 y 10.

No se prevee a corto plazo, la instalación de aparatos de registro automático de nivel en el curso superior del Río Reventado, pues el alto contenido de sólidos hacen imposible su empleo. Una vez, que el equilibrio hidrológico se haya restablecido a cierto grado, se estudiará la posibilidad de empleo de limnógrafos.

4.1 Caudales en el Puesto 2

Especial interés se dedicó a la obtención de las relaciones entre caudales y niveles en puesto 2, pues los mismos indicarían, aproximadamente, los caudales y volúmenes que se originan en toda la Cuenca Superior del Río Reventado, y por consiguiente, los que van a causar problemas en la zona de sedimentación, cerca de la ciudad de Cartago.

Como el transporte de sólidos hacía imposible el uso de molinetes, o de cualquier otro equipo immersible para la determinación de las velocidades de la corriente durante las avenidas, se recurrió al uso de flotadores por medio de los cuales se estimaba la velocidad superficial. Este procedimiento presentó los siguientes problemas:

- 1) Los flotadores se confundían dentro de la masa en movimiento, al quedar cubiertos por el lodo de la misma.
- 2) La turbulencia del flujo hacía moverse el flotador de uno a otro lado de la corriente.
- 3) El único tramo posible de usar, corto, de alta pendiente e irregular, no se prestaba para la medición de las altas velocidades de las avenidas del Reventado.
- 4) Se sabe que el variable contenido de partículas, provoca diferente comportamiento de la masa en movimiento, el cual no se rige por las leyes de la hidráulica clásica.
- 5) Por la misma razón apuntada anteriormente, no se conoce la relación entre la velocidad superficial y la media en estos flujos con alta concentración de partículas.

Con base en lo anterior se concluye que todo esfuerzo tendiente a correlacionar velocidad superficial, determinada por flotadores, con nivel del río y contenido de sólidos, tropezará con dificultades de no fácil solución.

En el caso del Reventado, se intentó la correlación gráfica - de los factores anteriormente mencionados. No se incluyen en este informe los gráficos respectivos, debido a la poca consistencia de las relaciones encontradas. Sin embargo, como información general, y con las limitaciones impuestas por los - problemas explicados anteriormente, se suministran en la Tabla D-6, las velocidades superficiales determinadas en el - puesto 2.

Dada la imposibilidad de determinar las velocidades, y por - consiguiente, los caudales del Río Reventado en forma directa, hubo que recurrir a métodos indirectos, los cuales se explican seguidamente.

El primer método se basa en estimar los caudales partiendo exclusivamente de los datos de lluvia, la cual fue convertida a caudal por medio de los hidrógrafos triangulares del "U.S. Soil Conservation Service". Este caudal proveniente de la lluvia - se incrementaba por la carga de sólidos, la cual en promedio, producía un aumento del 50 por ciento en la escorrentía, de acuerdo con las mediciones efectuadas en el puesto 2. Estos valores de caudal aumentado se registraban contra las correspondientes escalas observadas en el puesto 2, trazándose la curva A, de la lámina 15.

El otro método se basa en considerar que el caudal en el tramo de medición, se puede expresar por la ecuación:

$$Q = K A R^{2/3}$$

En donde Q es el caudal de lodo en m³/seg.; A es el área de la sección transversal en m²; R es el radio hidráulico en metros; y K es una constante que involucra la rugosidad del canal y el gradiente hidráulico.

Para simplificar y resolver el problema, se considera que K es una constante para cada avenida, de manera que K, sería el cociente del volumen de escorrentía directa (calculado de los registros de lluvia) más la carga de sedimentos y el área de gráfico A R^{2/3} contra t. Puesto en una ecuación sería:

$$K = \frac{E (1 + S)}{\int A R^{2/3} dt}$$

En donde E sería el volumen total de escorrentía directa de la tormenta bajo estudio, que se obtendrá de los registros de lluvia; S sería el porcentaje de incremento en volumen producido por los sólidos el cual se calcula de las muestras obtenidas durante la crecida (en promedio este valor es cercano al 50 por ciento) e $\int_0^T A R^{2/3} dt$ sería el área del gráfico A R^{2/3} contra el tiempo. Como se sabe, tanto el área transversal como el radio hidráulico son valores topográficos que dependen de la forma del cauce y nivel del río, por lo cual pueden ser obtenidos después de un levantamiento topográfico de la sección bajo estudio.

Una vez obtenidos los valores de K, correspondientes a cada una de las avenidas, se calculó un valor promedio, el cual se usó en el cálculo de la curva de descarga, que aparece en la lámina 15 (curva B). Finalmente se consideró que la curva de descarga más representativa para el puesto 2, debería estar entre las dos tendencias dadas por la curva A y B; por lo tanto se trazó a criterio la curva C (Ver lámina 15), que se considerará como la curva de descarga para el puesto 2, y aplicable sólo para las avenidas ocurridas entre el 9 de diciembre de 1963 y el 6 de octubre de 1964. Esto es debido a que el puente de Llano Grande, donde se ubicaba el sitio de medición, fue destruido el 10 de octubre de 1964 por el deslizamiento de Llano Grande, perdiéndose por consiguiente, las marcas de referencia, y se introdujeron cambios en el área transversal. A partir del mes de junio de 1965, las mediciones de nivel se efectúan a unos 75 metros aguas arriba del sitio anterior, en un tramo del río más adecuado y estable.

5.- INFORMACION DISPONIBLE SOBRE SEDIMENTOS Y ANALISIS DE LA MISMA

Un muestreo continuo de los sedimentos transportados por las avenidas era, sin duda alguna, de gran interés para los estudios tendientes a encontrar una solución al problema del Río Reventado. Por esa circunstancia, una vez que el I.C.E. fue encomendado de realizar tal estudio, se dedicó especial interés al programa de muestreo, labor en que prestó colaboración el personal de la Guardia Civil destacado en los puestos 2, 3 y 9.

Dadas las características del flujo, era imposible el uso de los mues -

treadores para sedimento suspendido, del tipo de los desarrollados por el Comité de Sedimentación de los E.E.U.U. de N. A., pues su inmersión, por la densidad y velocidad del fluido, además de muy difícil, hubiera resultado en la destrucción del equipo por las piedras transportadas por la avenida; adicionalmente, este equipo ha sido diseñado para ríos normales y por lo tanto los diámetros de las boquillas hubieran resultado inadecuados para usarlas en lodo. En vista de lo anterior, fue necesario obtener las muestras por medio de un recipiente de boca ancha (unos 15 cm.) de diámetro el cual era arrojado a la corriente para que recogiera la muestra y recobrado con una cuerda. La muestra se traspasaba integramente a un recipiente de hojalata, debidamente identificado mediante un número, se tapaba muy bien y se enviaba al laboratorio para su análisis, junto con el informe, en el cual se indicaba el número de recipiente, la fecha, la hora, el sitio del muestreo y el nivel del río. Los análisis lo efectuaban personal del I.C.E. en el laboratorio de Suelos de la Universidad de Costa Rica. A todas las muestras se les determinó:

- a) Densidad original
- b) Contenido de sólidos

A las muestras correspondientes a los niveles más altos de cada semana se les hacía, además, una granulometría completa (vía seca y vía húmeda), y se les determinaba la gravedad específica de los sólidos. En total se analizaron en 1964, 98 muestras, de las cuales 73 fueron recogidas en el puesto 2, 17 en el puesto 3 y 8 en la estación fluvio-gráfica de Agua Caliente. A quince muestras se les hizo el análisis granulométrico completo, con base en los cuales se trazó la curva mos-

trada en la lámina 13. Los resultados de los análisis de las 98 muestras aparecen en las Tablas D-6, D-7 y D-8.

Con base en la teoría desarrollada por Bagnol (24), se ha encontrado que durante las grandes avenidas del Reventado, cerca del 80 por ciento de las partículas, contribuyen a acelerar el fluido. con lo cual se explican las altas velocidades alcanzadas por estos flujos de lodo (se han medido velocidades superficiales hasta de 10 metros por segundo en el puesto 2).

(24) Shepard, Francis P. (ed): Sub-Marine Geology (New York: Harper & Row, Second Edition, 1963) pp 132 - 142

T A B L A D-6

ANALISIS DE LAS MUESTRAS DEL MATERIAL TRANSPORTADO POR EL
RIO REVENTADO OBTENIDAS EN EL PUESTO 2

Fecha	Escala en Metros	Densidad original de la muestra	Gravedad Específica	Concentración W_s/W_w p.p.m.	Velocidad superficial en el rio al tomar la muestra m/Seg.
8- 9-64	6.1	-	-	2.50 714000	-
8- 9-64	3.0	-	-	1.96 662000	5.00
8- 9-64	2.7	-	-	2.71 730000	4.44
8- 9-64	2.4	-	-	1.06 515000	-
8- 9-64	3.7	-	2.57	1.15 535000	3.33*
8- 9-64	1.8	-	-	0.34 254000	-
9- 9-64	1.8	-	-	1.32 569000	3.64
10- 9-64	1.5	-	-	2.38 704000	-
11- 9-64	3.7	-	-	0.80 444000	3.33
22- 9-64	1.5	1.62	-	1.62 618000	4.00
22- 9-64	2.3	1.42	2.65	1.36 576000	4.45*
22- 9-64	1.3	1.61	-	1.36 576000	3.63
22- 9-64	1.2	1.73	-	1.61 617000	-
25- 9-64	-	1.76	-	3.52 769000	-
25- 9-64	3.7	1.29	2.61	1.71 630000	- *
25- 9-64	3.4	1.53	-	2.01 668000	-
25- 9-64	3.0	1.14	-	1.25 556000	-
25- 9-64	2.7	1.66	-	3.09 755000	3.1
25- 9-64	1.8	1.57	-	1.29 654000	4.0
25- 9-64	1.5	1.46	-	2.47 712000	-
25- 9-64	1.2	1.52	-	2.10 677000	-
29- 9-64	1.2	1.26	-	0.96 490000	-
29- 9-64	1.8	1.38	-	1.41 585000	5.71
3-10-64	2.1	1.53	2.70	1.50 600000	- *
3-10-64	1.8	1.57	-	1.42 587000	-
11-10-64	.9	1.10	-	0.03 290000	-
11-10-64	3.7	1.54	2.65	1.04 510000	- *
11-10-64	2.7	1.39	-	0.80 444000	-
11-10-64	1.2	1.54	-	0.42 296000	-
12-10-64	.9	1.15	-	0.16 138000	-
12-10-64	2.1	1.13	-	0.17 145000	-
12-10-64	1.5	1.20	-	0.17 145000	-
12-10-64	.3	1.14	-	0.17 145000	-
13-10-64	1.5	1.35	-	2.62 724000	-
13-10-64	2.1	1.30	-	2.60 722000	-
13-10-64	2.1	1.80	-	1.57 625000	-
13-10-64	1.2	1.57	-	1.56 609000	4.45
13-10-64	1.5	1.32	-	1.63 627000	2.86
13-10-64	2.1	1.65	-	1.53 604000	4.00
13-10-64	2.4	1.75	-	1.56 609000	5.00
13-10-64	3.0	1.90	-	2.38 705000	5.71
13-10-64	3.7	1.39	-	2.01 663000	-

(Continua)

(Continuación Tabla D-6)

Fecha	Escala en Metros	Densidad original de la muestra	Gravedad Específica	Concentración W_s / W_w p.p.m.	Velocidad superficial en el río al tomar la muestra m/Seg.
16-10-64	1.2	1.18	-	0.15 130000	3.33
16-10-64	1.5	1.18	-	0.12 107000	4.45
16-10-64	1.8	1.29	-	0.32 242000	5.71
16-10-64	2.1	1.23	2.60	0.25 200000	5.71 *
20-10-64	1.2	1.42	-	0.42 296000	-
20-10-64	1.5	1.43	-	0.56 359000	-
20-10-64	1.3	1.40	-	0.60 375000	-
20-10-64	2.1	1.53	-	1.10 524000	-
21-10-64	.6	1.19	-	0.18 152000	5.00
21-10-64	1.2	1.50	-	0.50 333000	3.33
21-10-64	1.8	1.30	-	0.40 286000	2.86
21-10-64	2.4	1.40	-	0.71 415000	2.86
21-10-64	3.0	1.69	-	1.02 505000	1.02
23-10-64	4.6	1.90	-	2.80 737000	8.00
23-10-64	5.5	1.73	2.60	2.24 691000	10.00 *
23-10-64	4.9	1.98	-	2.08 675000	10.00
23-10-64	4.0	1.73	-	2.33 700000	10.00
23-10-64	3.4	1.71	-	1.48 597000	5.00
23-10-64	2.4	1.63	-	1.44 590000	4.40
23-10-64	1.5	1.54	-	0.62 383000	5.70
27-10-64	2.1	1.38	-	0.48 324000	-
27-10-64	2.4	1.63	2.50	1.48 597000	- *
27-10-64	1.8	1.19	-	0.33 248000	-
31-10-64	1.2	1.63	-	1.33 580000	-
31-10-64	.9	1.61	-	1.44 590000	-
2-11-64	4.6	1.88	-	1.79 642000	-
2-11-64	3.7	1.63	2.64	1.93 659000	- *
2-11-64	3.0	1.69	-	1.78 640000	-
2-11-64	2.4	1.75	-	1.58 612000	9.09
2-11-64	1.3	1.69	-	1.54 606000	9.09
2-11-64	1.2	1.64	-	1.50 600000	4.88
Promedio		1.54	2.61	1.35 574000	

Notas: W_s = Peso seco de los sólidos en la muestra

W_w = Peso del agua en la muestra

p.p.m. = Partes por millón = $\frac{W_s}{W_s + W_w} \times 10^6$

(*) = Muestras de las cuales se obtuvo granulometría completa (vía seca y vía húmeda).

T A B L A D-7

ANALISIS DE LAS MUESTRAS DEL MATERIAL TRANSPORTADO POR
EL RIO REVENTADO OBTENIDAS EN EL PUESTO 3

Fecha	Escala en Metros	Densidad original de la muestra	Gravedad Específica	Concentración W_s/W_w p.p.m.
16-10-64	.9	1.56	-	1.32 520000
16-10-64	1.5	1.63	-	0.72 419000
20-10-64	3.0	1.32	2.69	1.32 645000*
20-10-64	2.1	1.65	-	1.22 550000
21-10-64	3.0	2.75	-	1.20 545000
21-10-64	1.8	3.40	-	0.74 425000
21-10-64	1.2	2.65	-	1.79 642000
23-10-64	3.0	2.16	2.64	2.53 717000*
23-10-64	1.5	1.84	-	2.35 701000
23-10-64	1.8	1.43	-	0.33 454000
31-10-64	1.2	1.39	-	3.71 722000
1-11-64	1.3	1.75	-	2.20 682000
1-11-64	.9	1.79	-	2.32 699000
2-11-64	.9	1.84	-	2.54 712000
2-11-64	1.5	1.70	-	2.07 674000
2-11-64	1.3	0.70	-	2.79 736000
2-11-64	5.5	<u>1.39</u>	<u>2.67</u>	<u>3.69</u> 727000*
Promedio		1.91	2.67	1.99 666000

Notas: W_s = Peso seco de los sólidos en la muestra

W_w = Peso del agua en la muestra

p.p.m. = Partes por millón = $\frac{W_s}{W_s + W_w} \times 10^6$

(*) = Muestras de las cuales se obtuvo granulometría completa (vía seca y vía húmeda).

T A B L A D-8

ANALISIS DE LAS MUESTRAS DEL MATERIAL TRANSPORTADO POR EL RIO AGUA
CALIENTE OBTENIDAS EN EL SITIO DE LA ESTACION FLUVIOGRAFICA

Fecha	Escala en Metros	Densidad original de la muestra	Gravedad Específica	Concentración W_s/W_w p.p.m.	
23-10-64	2.8	1.80	2.50	1.70	630000*
23-10-64	3.7	1.85	2.50	1.45	592000*
23-10-64	1.5	1.19	-	0.14	123000
23-10-64	3.4	1.46	-	0.72	419000
2-11-64	1.60	1.82	2.62	2.27	694000*
2-11-64	1.20	1.86	-	2.36	702000
2-11-64	1.00	1.13	-	2.00	667000
2-11-64	0.86	<u>1.22</u>	-	<u>0.32</u>	<u>242000</u>
Promedio		1.54	2.54	1.37	578000

Notas: W_s = Peso de los sólidos en la muestra

W_w = Peso del agua en la muestra

p.p.m. = Partes por millón $= \frac{W_s}{W_s + W_w} \times 10^6$

(*) = Muestras de las cuales se obtuvo granulometría completa (vía seca y vía húmeda).