CAPITULO 6

ANALISIS HIDROLOGICO

E HIDRAULICO

6.1 Introducción

Una de las finalidades principales del presente estudio es caracterizar el evento ocurrido el 18 de Junio de 1991 en Antofagasta, no sólo desde puntos de vistas más generales como han sido los meteorológicos y geológicos-geomorfológicos, presentados en los dos capítulos anteriores de este informe, sino también desde una perspectiva más específica orientada a fines aplicados. Ello, con el objetivo último de establecer los fundamentos técnicos necesarios para formular recomendaciones orientadas a reducir los riesgos sobre la ciudad y la población , pretendiendo de este modo mitigar las consecuencias adversas de eventos catastróficos futuros similares al ocurrido en 1991.

Teniendo en consideración este objetivo y enmarcándose dentro de las limitaciones que determinan los antecedentes disponibles así como el conocimiento científico-técnico actual del tema, se ha llevado a cabo un análisis de tipo hidrológico e hidráulico del evento que permite por un lado realizar una caracterización, a modo de diagnóstico, de las corrientes de detritos ocurridas en las quebradas más importantes de la ciudad de Antofagasta el año 1991, y por otro, delinear un pronóstico que puede servir de base para analizar con mejor fundamento soluciones estructurales al problema.

El análisis hidrológico-hidráulico de la fase de diagnóstico está basado en los datos provenientes de otros estudios y de aquellos obtenidos como parte de la presente investigación. Se ha desarrollado empleando una metodología que se compone básicamente de dos etapas. La primera consiste en definir y cuantificar ciertos parámetros hidrológicos relevantes (precipitaciones, intensidades y coeficientes escorrentía), característicos del evento ocurrido en Antofagasta. Estos parámetros se confrontan y verifican con los resultados que se obtienen de un análisis hidráulico - mecánico fluvial independiente, realizado como parte de una segunda etapa, el cual aporta datos sobre caudales sólido-líquido de las corrientes de detritos, y de los caudales líquidos y concentraciones de sólidos asociados, en las distintas quebradas de la ciudad.

La fase de pronóstico constituye una extensión de los resultados y conclusiones que surgen del diagnóstico de la situación del 18 de Junio de 1991, en la cual se propone preliminarmente parámetros hidrológicos e hidráulicos que podrían servir de base para el prediseño de estructuras hidráulicas de control o encauzamiento de corrientes detríticas futuras.

6.2 Metodología

6.2.1 Generalidades

La metodología para llevar a cabo el análisis hidrológico-hidráulico fue ideada y desarrollada teniendo en cuenta la cantidad, calidad y confiabilidad de la información disponible, así como los métodos de cálculo posibles de utilizar considerando la complejidad y nivel de conocimientos que se tiene actualmente acerca de estos fenómenos. Ha debido quedar claro de lo expuesto en el Capítulo 2, dedicado a la revisión de los antecedentes bibliográficos sobre corrientes de barro, que estos fenómenos presentan características muy variadas y que los modelos existentes para predecir algunas de sus propiedades hidráulicas son bastantes aproximados y muchas veces aplicables solo a situaciones particulares.

Como se ha reseñado anteriormente, el análisis realizado comprende una fase de diagnóstico y una de pronóstico. En la primera de ellas se caracteriza específicamente las condiciones hidrológicas asociadas al evento de Junio de 1991 y los flujos detríticos ocurridos en las principales quebradas de Antofagasta. La fase de pronóstico se basa en los antecedentes que surgen de la etapa anterior, proponiéndose en ella las condiciones hidrológicas e hidráulicas que podrían caracterizar a eventos futuros similares al de 1991, pero asociados a períodos de retorno compatibles con la envergadura y requerimientos de seguridad de posibles obras hidráulicas a construir.

La fase de diagnóstico se compone de dos etapas, de modo que los análisis hidrológicos e hidráulicos se realizan cada uno en forma independiente en todas las cuencas, pero sus resultados se confrontan mutuamente para verificar o modificar supuestos de cálculo. El resultado de esta comparación conduce a adoptar finalmente valores para los distintos parámetros de cálculo, entre los que se encuentra la precipitación e intensidad de la tormenta, el coeficiente de escorrentía, la concentración volumétrica de sólidos y los caudales del flujo de detritos y de agua. Los análisis hidrológicos son absolutamente convencionales pero no así los análisis hidráulicos, ya que ellos se basan en el uso de modelos matemáticos teóricos o empíricos directos o adaptados de la literatura revisada.

En último término, los parámetros hidrológicos e hidráulicos se globalizan atendiendo a consideraciones de orden físico, lo que permite en una segunda fase del análisis, proponer condiciones y parámetros para el pronóstico de eventos de probabilidad de excedencia o período de retorno distinto al ocurrido en 1991.

6.2.2 Análisis Hidrológico

Comprende el análisis de la información pluviométrica histórica disponible en distintas estaciones, con el fin de determinar si existe un comportamiento típico de las lluvias en cuanto a su distribución espacial en las zona. Este análisis se realiza a nivel de precipitaciones anuales y de promedios anuales en las tres estaciones que existen en Antofagasta, que son de norte a sur: Cerro Moreno, Dirección General de Aguas (DGA) y Universidad Católica del Norte.

El análisis se hace extensivo también al temporal del 18 de Junio de 1991, estudiándose para él las distintas precipitaciones que originó en la ciudad y las intensidades según las diferentes duraciones que tuvieron los distintos episodios identificados en otros estudios. Las intensidades se calculan como valores medios a partir del tiempo total de la lluvia y también como intensidades medias máximas a partir de bloques del hietograma probable de la tormenta. Adicionalmente se analiza la posibilidad de que en las cuencas de menor tamaño, se haya alcanzado intensidades máximas asociadas a los tiempos de concentración respectivos.

Para efectos del cálculo de los tiempos de concentración se utiliza la fórmula de California, habiéndose descartado otras como la de Giandotti por no cumplir en este caso con los requisitos para su aplicación a las cuencas en estudio. En todo caso, esta fórmula muy probablemente no refleje las condiciones de las cuencas de Antofagasta donde el escurrimiento es el de una mezcla concentrada de sedimento y agua (es esperable que ella de origen a tiempos de concentración menores que los reales).

A partir de todo lo anterior, se estiman finalmente los caudales líquidos en las distintas cuencas utilizando la fórmula racional, para lo cual se supone a priori valores de los coeficientes de escorrentía basándose en las características de las cuencas: áreas y formas, pendientes medias, tipo de suelo, etc. Estos coeficientes se verifican más adelante comparando los caudales calculados con los que se obtiene del análisis hidráulico.

Con el objeto de hacer pronósticos preliminares, se realiza adicionalmente análisis de frecuencias de las precipitaciones máximas diarias obtenidas de los registros de las estaciones Cerro Moreno y Universidad Católica del Norte, ampliadas con datos de la estación Portezuelo discontinuada el año 1968. Estos análisis se complementan con datos de intensidades inferidas a partir de la información consignada en otros estudios, empleando la fórmula de Grunsky.

6.2.3 Análisis Hidráulicos

Atendiendo a la disponibilidad de información referente a trazas de las corrientes de detritos en distintas secciones de las principales quebradas, se realiza estimaciones de los caudales totales de estas corrientes. Estas estimaciones sirven de base también para determinar los caudales líquidos asociados, suponiendo ciertos valores de las concentraciones volumétricas de sólidos.

El cálculo está basado en el uso del modelo del flujo turbulento de barro de Takahashi y en diversas fórmulas empíricas que se seleccionaron de la literatura. Entre estas últimas cabe mencionar la de Yablonskiy, la utilizada por la Oficina de Planificación Municipal de Pekín (OFPMP) y la fórmula empírica deducida de los lahares del volcán Mt. St Helens.

En la fórmula de Takahashi, la concentración de sólidos es un dato que hay que suponer de antemano, lo mismo que en la fórmula de OFPMP; la fórmula de Yablonskiy arroja una concentración aproximadamente constante pero la de Mt. St Helens es aplicable sólo a un rango del 70 a 80% de concentración.

Con el fin de verificar estas suposiciones del cálculo, se analiza los coeficientes de escorrentía obtenidos a partir de la división entre el caudal líquido obtenido de la aplicación de las fórmulas y el producto del área de la cuenca por la intensidad, es decir, empleando la fórmula racional con los coeficientes de escorrentía como incógnitas. Este análisis exige también adoptar determinadas intensidades de lluvia, razón por la cual no arroja una conclusión única.

Debido a lo anterior, el cálculo hidráulico se complementa con la estimación de coeficientes de rugosidad de las quebradas (haciendo uso de ecuación de Manning conocidos, el caudal, el factor de conducción hidráulica y la pendiente del cauce) y con una clasificación de las cuencas atendiendo a su área aportante, su pendiente media y su tiempo de concentración. La agrupación de las cuencas en diferentes categorías provee de elementos de juicio adicionales que permiten acotar en forma más fundamentada los coeficientes de escorrentía calculados, en tanto, las rugosidades permiten acotar los caudales totales y líquidos dentro de rangos compatibles con las características topográficas e hidráulicas de los cauces.

6.3 Características de las Cuencas en Estudio

6.3.1 Generalidades

El rasgo principal de la II Región lo constituye el desierto con sus diversas variedades de climas y con una configuración geográfica compleja. En la zona costera

se distinguen fundamentalmente dos rasgos del relieve: el primero es la Planicie Costera, definida entre la línea de la costa y la Cordillera de La Costa, que es un territorio llano con un ancho medio de 4 km y con un desarrollo longitudinal que se ve ocasionalmente interrumpido por la intrusión de la Cordillera de La Costa, la cual cae abruptamente al mar en la forma de acantilados; el segundo lo conforma la Cordillera de la Costa, rasgo geográfico de importancia que se presenta como un relieve masivo de aproximadamente 50 km de ancho medio y una altura promedio de 2000 msnm. Es una barrera natural que incide fuertemente en las características climatológicas de la región.

En el marco de esta estructura geográfica, se desarrolla en Antofagasta un conjunto de cuencas que constituyen las áreas naturales de drenaje de la zona occidental de la Cordillera de La Costa hacia el océano Pacífico. Estas cuencas presentan una gran variedad de formas y tamaños, con áreas que van desde menos de 1 km^2 hasta los 2200 km^2. Su red de drenaje la conforman quebradas de diversos grados de importancia que nacen al interior cordillerano y que en general se desarrollan en dirección este-oeste, desembocando en la actualidad la mayoría de ellas en zonas urbanas. La geometría que presentan sus cauces es variada, ya sea a lo largo de ellos o al compararlos entre sí. Los cauces en algunos casos son estrechos y bien encajonados con laderas abruptas, mientras que en otros son anchos y algo sinuosos, pero todos ellos tienen en común una fuerte a muy fuerte pendiente.

La composición del suelo de las cuencas en general muestra la presencia de finos (arenas eólicas) como una característica común de la zona, que a veces se mezcla con material granular grueso a medio, (formación de La Negra) salvo en algunos puntos localizados en quebradas donde aflora la roca fracturada o meteorizada.

6.3.2 Definición y Características Fisiográficas

Las cuencas de la ciudad de Antofagasta que se han considerados como parte del presente estudio abarcan desde La Chimba por el norte hasta el Huáscar por el sur.

La definición de sus superficies aportantes se ha hecho en las planchetas escala 1:50.000 del IGM que era la única cartografía disponible a la fecha de realización del estudio. Aparecen dibujadas en los planos de la Figs.6.1 y 6.2 del presente capítulo.

Con el fin de caracterizar las cuencas,se determinó un conjunto de parámetros fisiográficos que las distinguen. Estos parámetros son los siguientes:

- Area (A):superficie de una cuenca comprendida entre los límites que las definen.

- Pendiente media (i): queda dada por la siguiente expresión:

$$i = \frac{\Delta H}{A}\left(\frac{l_o}{2} + \sum_{k-1}^{n-1} l_k + \frac{l_n}{2}\right) \qquad (6.1)$$

donde ΔH es el desnivel entre las curvas de nivel consideradas para la determinación de i, y l_k es la longitud de la curva de nivel k. Mientras que l_o y l_n son las longitudes de las curvas de nivel inicial y final, respectivamente.

- Densidad de drenaje (DD): Está dada por la razón entre la extensión de todos los cauces de la cuenca y el área de ellas.

$$DD = \frac{\sum_{k-1}^{n} l_k}{A} \qquad (6.2)$$

- Perímetro divisorio (PD): Longitud del límite que define el área de la cuenca.
- Cota Media (CM): cota a la cual se asocia el 50% de la superficie de la cuenca. Se obtiene a partir de las curvas hipsométricas.
- Longitud del cauce principal (LCP): Longitud del cauce de mayor importancia de la cuenca.

En la Tabla 6.1 se tabula el valor de los parámetros descritos para las cuencas de la zona de Antofagasta que han sido consideradas en este estudio.

6.4 Estudio de las Precipitaciones

6.4.1 Generalidades

El presente punto tiene como objetivo caracterizar hidrológicamente el evento ocurrido en Antofagasta en la madrugada del día 18 de Junio de 1991 y analizar, en la medida de lo posible, la frecuencia que puede atribuirse a la ocurrencia de esto tipo de eventos en la II Región, en particular en esta ciudad.

Para lograr lo anterior, luego de un análisis de la información básica disponible en la región (ver Fig 6.3), el estudio se divide en dos etapas. La primera, está enfocada a la determinación de las intensidades máximas de lluvia, en quebradas de Antofagasta, durante el evento del día 18 de junio de 1991, con el fin de determinar el máximo caudal que pudo haber escurrido por cada una de éstas. En la segunda etapa desarrollada, fundamentalmente en base a la información pluviométrica

TABLA 6.1: CARACTERISTICAS FISIOGRAFICAS DE LAS CUENCAS DE ANTOFAGASTA

N	Cuencas	A (km2)	PD (km)	P	L (km)	DD (1/km)	CM (m.s.n.m)
1	La Chimba	25.6	22 5	0.292	9.5	0 81	762
2	Rocas	1.8	8 0	0 271	2.0	1 12	564
3	Club Hipico	3.2	10.5	0 382	4.0	1.27	727
4	Bonilla	6.7	1.2	0.302	4.0	0.86	521
4a	Bonilla Norte	3 4	10.0	0.302	2.0	0.59	550
4b	Bonilla Sur	3 3	11 8	0.338	4 0	2 12	500
5	Farellones	3 8	12 5	0.263	5 0	1 25	564
6	Salar del Carmen	33 2	36 5	0 244	8 0	0.49	633
6a	Salar del Carmen N2	6.9	15.5	0 254	6.0	0.87	736
7	La Cadena	21.0	22.0	0 200	9.0	0.78	607
8	El Ancla	1 3	6 0	0.076	2.0	1.52	315
8a	El Ancla Norte	0 1	1 5	0.138	0.5	5 00	270
8b	El Ancla Sur	1 2	6.0	0.170	2 0	1 67	370
8-9 1	Riquelme	0.2	2.0	0 244	0 9	4.50	400
8-9 2	Baquedano	0.6	4 0	0 308	1.2	2.00	410
8-9.3	Uribe	0.5	4.0	0 278	1.3	0.50	440
9	El Toro	3.2	10.5	0.304	3.5	1.08	467
10	Caliche	2 2	6 5	0.180	2.0	0.91	358
10a	Caliche Norte	0 2	2 0	0.288	0.7	3.50	150
10b	Caliche Sur	2.0	6 5	0.206	2 0	1 00	360
11	La Negra	2208.0	279.0	0 148	99 0	0 54	1275
1*	Sobre Grande	251.6	6 5	0.125	30 0	0.91	1120
2*	Del Guay	152.0	6 2	0 125	16 0	0.50	1100
3*	Remiendos	567.8	123.0	0 140	42.0	0.40	1271
4*	Grande	443.7	108.5	0 177	18.0	0.74	1271
5*	Intermedia (Q.Mateo)	792.9	175.0	0.146	60.0	0.09	1000
11-12	U. de Antofagasta	1.2	4.5	0.156	1 9	1 58	290
12	Jardines del Sur	9 2	14 0	0.127	5 6	0 98	426
13	El Huascar	2.7	8.5	0.090	3.8	1.41	330

Nota : Todas las cuencas se indican en el plano de Fig 6.1, salvo las anotadas por * que pertenecen a la cuenca de la Negra y que se definen en el plano de la Fig. 6.2.

disponible en la región de Antofagasta, se intenta definir curvas intensidad-frecuencia que puedan servir de base para inferir la intensidad media de la precipitación asociada a la ocurrencia de eventos futuros.

6.4.2 Análisis de la Información Histórica Disponible

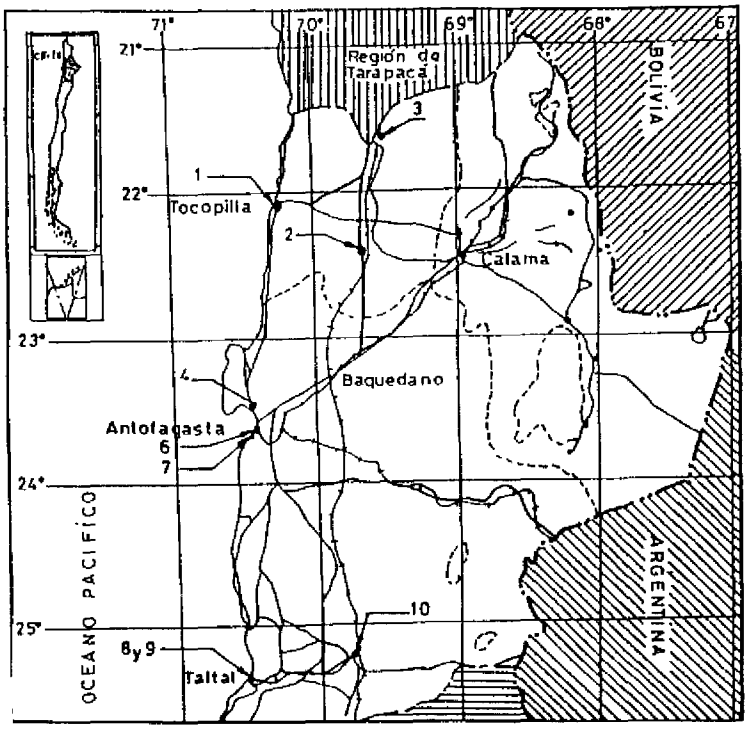
De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada, la información pluviométrica disponible en las zonas en estudio es escasa. Tal como se desprende del diagrama de barras que se presenta en la Fig 6.4, existen muchos años sin información ya que algunas estaciones se han suprimido y luego se han reinstalado; tampoco existen descripciones claras y concretas en cuanto a la ubicación de algunas estaciones. Se aprecia también que, en general, la información no es concurrente en el tiempo.

La estadística de cada una de estas estaciones, presentadas en el Anexo III, permite inferir como precipitación media anual en las estaciones de interés, para todo el período en que se dispone de información, aquellos valores que se indican en la Tabla 6.2.

TABLA 6.2 PRECIPITACION MEDIA ANUAL II REGION ENTRE TALTAL Y TOCOPILLA

ESTACION	N° AÑOS	P (mm)
TOCOPILLA	18	2,83
Co MORENO	23	2,95
PORTEZUELO	59	4,70
DGA ANTOFAGASTA	13	5,51
U.CATOLICA DEL NORTE	24	4,25
TALTAL	29	17,85

Al comparar las precipitaciones medias anuales en las estaciones de la ciudad de Antofagasta (Co. Moreno, Portezuelo, DGA y U. Católica del Norte) se aprecia que Co. Moreno presenta precipitaciones menores. En períodos concurrentes (1979-1991) las tres estaciones que poseen información muestran que la precipitación media anual aumenta hacia el sur, tal como se indica en la Tabla 6.3. Sin embargo, esta tendencia se invierte en algunos años, según se aprecia en la Fig 6.5, donde se observa variaciones significativas en los valores de la precipitación anual registrada en Co. Moreno y la Universidad Católica del Norte.



1 Tocopilla	6 DGA Antofagasta
2 Coya Sur	7 Univ Católica del Norte
3 Quillagua	8 Taltal
4 Cerro Moreno	9 Taltal
5 Portezuelo	10 Catalina

Fig 6.3 Plano de Ubicación de las Estaciones Pluviométricas

ESTACION	LAT.	LONG.	ALT.
TOCOPILLA	22°05'	70°13'	16
COYA SUR	22°24'	69°38'	1290
QUILLAGUA	21°37'	69°32'	802
Co. MORENO	23°26'	70°28'	119
PORTEZUELO	?	?	?
DGA ANTOFOGASTA	23°36'	70°23'	50
U.CATOLICA DEL NORTE	23°40'	70°24'	?
TALTAL	25°25'	70°34'	39
TALTAL	25°25'	70°34'	9
CATALINA	25°13'	69°43'	2180

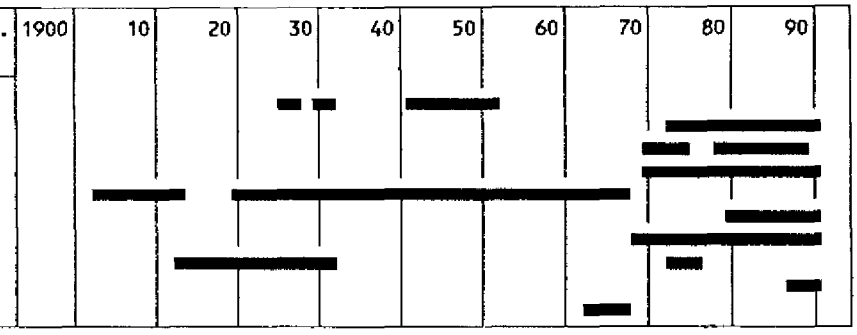


Fig. 6.4: Diagrama de Barras Información Fluviométrica. II Región

También en las tormentas individuales se observa una variabilidad espacial importante, la que en general podría explicarse por la presencia de actividad convectiva, semejante a la observada en el evento del 18 de Junio de 1991. En la Fig 6.6 se grafica esta variación espacial, según los registros disponibles en estaciones de la zona costera que abarca desde Tocopilla (TOC) hasta Taltal (TAL) en algunos temporales de importancia.

TABLA 6.3 PRECIPITACION MEDIA ANUAL (1979-1991) EN ANTOFAGASTA

ESTACION	P(mm)
Co. Moreno	2,58
DGA	5,51
U.Católica del Norte	6,46

En la Fig 6.7 se muestra la relación que existe en algunos eventos de precipitación entre el valor diario registrado en las estaciones Co. Moreno y Universidad Católica del Norte, obtenida en base a la información de aquellos eventos de mayores precipitaciones en la estación U. Católica del Norte. Los registros muestran también la ocurrencia de algunos eventos que no son registrados en todas las estaciones; así por ejemplo, mientras en Enero de 1983 la precipitación es nula en Co. Moreno, en la estación de la DGA se registran 6 mm y en la de la Universidad Católica del Norte (UCN) sólo 0,8 mmm, en cambio en Agosto de 1976 en Co. Moreno se informan 9,1 mm de agua caída y en la UCN no se registra precipitación. En consecuencia, podría decirse que en los eventos de tormenta no existe un comportamiento único en cuanto a la distribución de precipitación, ya que en algunos casos las magnitudes mayores se registran en Antofagasta, en tanto en otros casos al sur y en otros al norte de ésta.

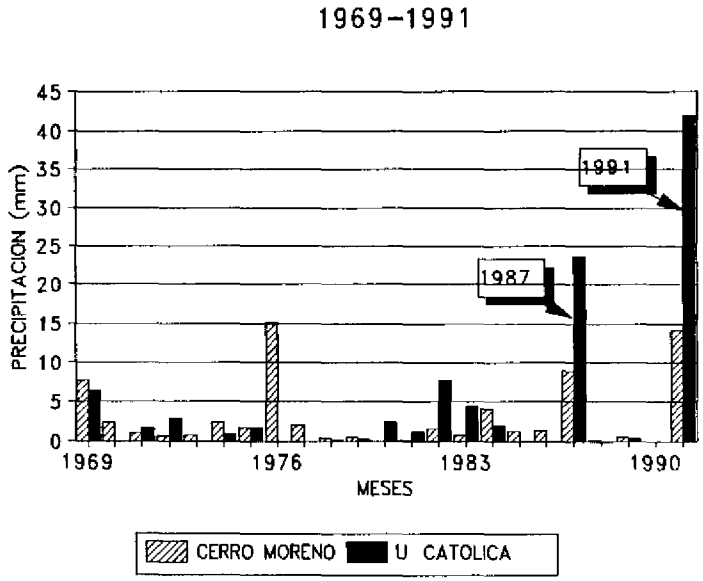


Fig 6.5 Precipitaciones Anuales en Antofagasta

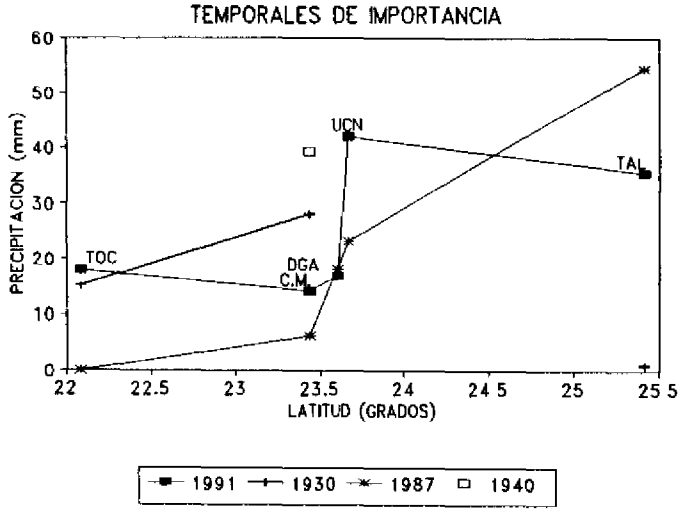


Fig 6.6 Variación Latitudinal de la Precipitación II Región

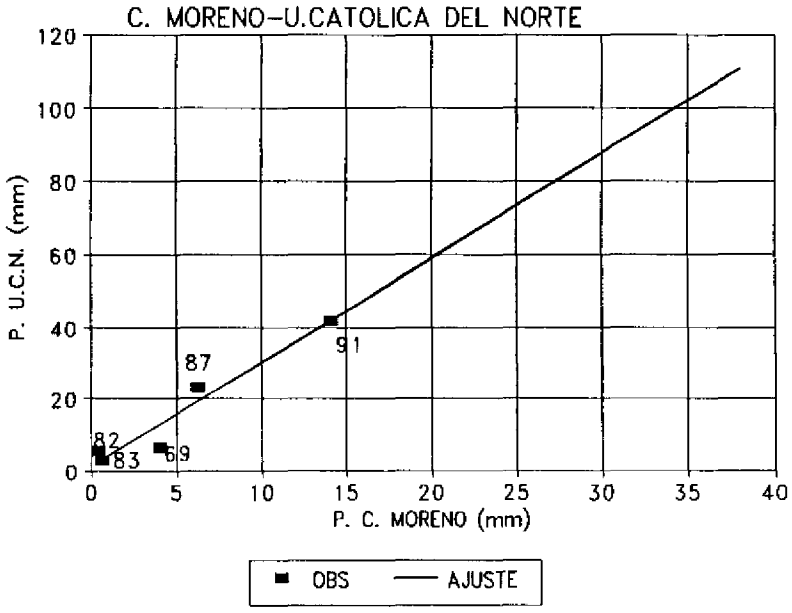


Fig 6.7 Comparación entre Precipitaciones UCN - Co Moreno

6.4.3 Análisis de la Tormenta del 18/6/91

La información pluviométrica disponible para esta tormenta en la zona de Antofagasta, corresponde a los registros de las estaciones de la DGA y de la U.Católica del Norte (U.C.N). Los valores de las precipitaciones observados el 18 de Junio de 1991 se muestran en la Tabla 6.4.

TABLA 6.4: PRECIPITACION DEL 18/6/91 EN ANTOFAGASTA

Estación	Precipitación (mm)
DGA	17
UCN	42

La variabilidad espacial que se observa en los precipitaciones puede ser atribuida a su carácter convectivo, como ya ha sido señalado. Por otra parte, el análisis comparativo de las precipitaciones observadas en Cerro Moreno y UCN (Fig 6.5),

permite apreciar la existencia de una variabilidad a nivel histórico que es especialmente notoria durante las tormentas intensas. Por estas razones es posible descartar un error sistemático de medición.

Si bien la duración de la tormenta se ha estimado en 3 hrs., los antecedentes disponibles indican que del total de agua caída registrada en la UCN, 5 mm cayeron en la primera hora y media, mientras que el resto (37 mm), lo hicieron en la hora y media restante (Araya (1991); Covarrubias et al. (1991), Karzulovic (1991), Skorin (1991) y Van Sint Jan et al. (1991))

Teniendo en cuenta estos antecedentes, se ha supuesto una variación lineal de las precipitaciones en dirección norte-sur, entre las estaciones de la DGA y la UCN. Por medio de esta distribución espacial, se hace una estimación de las precipitaciones e intensidades de lluvia para cada cuenca considerada en el estudio, calculadas estas últimas a partir de 3 hrs (duración total), de 1.5 hrs (bloque de lluvias de mayor intensidad) y del tiempo de concentración de cada cuenca.

En las Tablas 6.5 y 6.6 se incluye las áreas aportantes (Ap), longitudes de cauce (L_c), pendiente media del cauce (i) y tiempos de concentración (T_c) de las cuencas referidas a cada una de las secciones de medición de trazas del eje hidráulico de la corriente de barro. La primera de estas tablas incluye las cuencas definidas en el presente estudio, en tanto en la segunda se detallan las cuencas definidas en el estudio de Skorin Ingenieros (1991).

El tiempo de concentración ha sido estimado de acuerdo a la fórmula de California, dada por:

$$T_c = 0{,}95 \left(\frac{L_c^3}{H}\right)^{0{,}385} \qquad (6.3)$$

donde T_c es el tiempo de concentración (horas), L_c la longitud del cauce principal (km) y H el desnivel (m) entre el punto de inicio del cauce y el punto de interés. Como se ha señalado anteriormente, este tiempo es sólo referencial por cuanto se estima que no refleja las condiciones reales de cuencas áridas como las de Antofagasta donde las corrientes sólido-líquidos concentradas y difusas son más lentas que las de agua pura.

TABLA 6.5 PARAMETROS FISIOGRAFICOS Y TIEMPOS DE CONCENTRACION PARA CUENCAS DEFINIDAS EN EL PRESENTE ESTUDIO

Quebradas	Tipo	Ap (km2)	Lc (Km)	H (m)	Ic (%)	Tc (hr)
La Cadena Sector Alto	CZ1	6.02	5.5	500	9 1	0.62
La Cadena Antes Affte N 1	CZ1	6.80	6.0	550	9.2	0.66
Affuente N1	BZ1	4 00	4 5	410	9.1	0.53
Affuente N2	BY2	2 67	4 0	420	10.5	0.46
Affuente N3	BY2	2 33	1 5	180	12.0	0.21
Affuente N4	BY2	3 23	2.5	300	12.0	0.30
S. Del Carmen N2-B	CZ1	13.07	3 9	260	6 8	0 53
S Del Carmen N2 Sector Alto	CY1	5 40	3 0	200	6 7	0 44
S Del Carmen Affuente N1	CY1	6.21	3.3	300	9 1	0 42
S Del Carmen Affuente N2	AY2	0.52	1 0	150	15 0	0.14
S Del Carmen N2	CZ1	13 89	4 2	290	7 0	0 55
S Del Carmen o Caracoles	CZ2	9 95	6 0	650	10 8	0 62
El Toro	BY2	3 82	3 0	450	15 0	0.32
El Ancla	BY1	1 25	2 5	250	10 0	0 33
Del Guay	DZ1	152.00	22.0	570	2.6	3.00
De Mateo (ag. ar. Del Guay)	DZ1	400 00	18 0	270	1 5	3 00
De Mateo (ag. ab. Del Guay)	DZ1	552 00	18.0	270	1 5	3 00
De Mateo	DZ1	204 00	15 5	190	1 2	3 00
La Negra (en vertientes)	DZ1	255 00	19 5	370	1 9	3 00
La Negra (Sector Terminal 1)	DZ1	255 00	20 5	410	2 0	3 00
La Negra (Sector Terminal2)	DZ1	255 00	20.5	410	2.0	3.00

Ap Area Aportante

Lc Longitud del cauce

H Desnivel entre el inicio del cauce y el punto de interes

Ic Pendiente del cauce

Tc Tiempo de concentracion

TABLA 6.6 PARAMETROS FISIOGRAFICOS Y TIEMPOS DE CONCENTRACION PARA CUENCAS ADICIONALES DEFINIDAS POR SKORIN INGENIEROS (1991)

Quebradas	Secciones	Tipo	A (km2)	Ap (km2)	L (Km)	Lc (Km)	H (m)	ic (%)	Tc (hr)
Club Hipico	S1	BY2	3 20	2 82	4.2	2.5	400	16 0	0 27
	S2	BY3		3 01		3 0	600	20.0	0.29
	S3	BY2		3 11		3 5	680	19 4	0 33
Bonilla Norte	S1	BX3	3 40	3 24	2 0	1.0	340	34.0	0 10
	S2	BY3		3 40		1 4	400	28.6	0.14
	S3	BY3		3 40		1 7	410	24.1	0 17
Bonilla Sur	S1	BY2	3 30	2 83	3.2	2 0	370	18 5	0.22
	S2	BY2		3 06		2 8	490	17.5	0.29
Farellones	S1	BY1	3.80	2 71	5 8	4 0	400	10 0	0.47
	S2	BZ1		3 28		4 4	450	10 2	0 50
	S3	BZ2		3 71		5 4	620	11 5	0.56
Salar del Carmen	S1	CZ2	33 20	17 06	8 2	6 0	660	11 0	0 62
	S2	CZ1		13.00		4 5	300	6 7	0.60
	S3	CZ1		30 25		7 0	360	5.1	0 93
La Cadena	S1	CZ1	22.00	16.77	9 6	8 0	650	8 1	0.87
	S2	CZ1		17 03		8 4	700	8 3	0 89
	S3	CZ1		21 56		9 2	750	8.2	0 98
El Ancla Norte	S1	AX3*	0 10	0 40	0.5	0 3	150	50.0	0 03
	S2	AX3		0 80		0.6	150	25 0	0 06
	S3	AY2		0 10		0.9	150	16 7	0.12
El Ancla Sur	S1	BY1	1.20	1 05	2 0	2 0	200	10 0	0 28
	S2	BY2		1 10		2 2	250	11.4	0 28
	S3	BY1		1 13		2 4	250	10 4	0 31
Riquelme	S1	AX2	0.20	0.10	0 9	0 3	50	16.7	0 05
	S2	AX3		0 13		0.5	150	30 0	0 06
	S3	AX3		0.20		0 7	220	31.4	0 08
Baquedano	S1	AX2	0.60	0 41	1 2	0.6	100	16 7	0.09
	S2	AX3		0.50		0 8	200	25 0	0 10
Uribe	S1	AX3	0.50	0 25	1 3	0.5	100	20 0	0.07
	S2	AX3		0 34		0 7	150	21.4	0 09
	S3	AY3		0 43		0 9	200	22 2	0 11
El Toro	S1	BY2	3 20	1 27	3.8	2 0	300	15.0	0 24
	S2	BY2		1 45		2 4	370	15 4	0.27
	S3	BY2		1.61		2 8	430	15.4	0 30
Caliche Norte	S1	AX3*	0 20	0 07	0.7	0 2	150	75 0	0.02
	S2	AX3*		0 13		0 5	210	42 0	0 05
	S3	AX3		0 20		0 7	250	35.7	0 08
Caliche Sur	S1	AX1	2 00	0 72	1.5	0 5	50	10 0	0 09
	S2	AY2		0.82		0 9	150	16.7	0 12
	S3	BY2		2 00		1 5	200	13 8	0.18
La Negra	S1	DZ1	2208	255 00		19 0	230	1 2	3 00
	S2	DZ1		255 00		19.5	250	1 3	3.00
	S3	DZ1		255 00		20 0	265	1.3	3.00
U de Antofagasta	S1	AY1	1 20	1 00	1.9	1 0	100	10 0	0.16
	S2	BY1		1.11		1 4	150	10.7	0 20
Jardin del Sur	S1	BY1	9.20	2 54	6.2	3 0	260	8 7	0 40
	S2	BY1		2.69		3 5	330	9.4	0 43
	S3	CZ1		9 13		6 2	450	7 3	0.74
El Huascar	S1	BY1	2.70	1 76	3.8	2 2	190	8 6	0 31
	S2	BY1		2 43		3 0	250	8 3	0 40
	S3	BY1		2 63		3 5	310	8 9	0.44

Adicionalmente se clasifican las cuencas de acuerdo a su tamaño, tiempo de concentración y pendiente media del cauce, en base a los siguientes criterios:

i) Area aportante

Tipo A: $Ap \leq 1\ km^2$
B: $1\ km^2 < Ap < 5\ km^2$
C: $5\ km^2 \leq Ap < 100\ km^2$
D: $Ap \geq 100\ km^2$

ii) Tiempo de concentración

Tipo X: $T_c \leq 0{,}1$ hr
Y: $0{,}1\ hr < T_c < 0{,}5$ hr
Z: $T_c \geq 0{,}5$ hr

iii) Pendiente media del cauce

Tipo 1 : $i \leq 10\%$
2 : $10\% < i < 20\%$
3 : $i \geq 20\%$
3*: $i >> 20\%$

En las Tablas 6.7 y 6.8 se indican las precipitaciones e intensidades medias tomando como base las duraciones de 3 hr y de 1,5 hr, de acuerdo a los antecedentes de la UCN. Para el cálculo se ha considerado que la precipitación observada en la estación DGA fue del orden de 15 mm, lo cual resulta de descontar el porcentaje de agua caída en la UCN durante la primera hora y media. También se incluye la intensidad obtenida para el tiempo de concentración de las cuencas como dato referencial.

El uso de una u otra intensidad en el análisis hidrológico, depende de las características de las cuencas. En aquellas que presentan áreas pequeñas con pendientes fuertes y tiempos de concentración bajos, resultaría lógico suponer la intensidad media asociada al bloque de 1,5 hr, mientras que en el resto sería más apropiado utilizar la intensidad media correspondiente a la precipitación caída en 3 horas.

TABLA 6.7 PRECIPITACIONES E INTENSIDADES DE LAS CUENCAS DE ANTOFAGASTA. ESTUDIO SKORIN (1991)

Quebradas	Secciones	Tipo	Pr(1 5 hr) (mm)	Pr(3 hr) (mm)	Im(1.5 hr) (mm/hr)	Im(3 hr) (mm/hr)	I(Tc) (mm/hr)
Club Hipico	S1	BY2	14.98	17 00	9.98	5.67	18.80
	S2	BY3	14 98	17 00	9.98	5 67	18 29
	S3	BY2	14.98	17.00	9.98	5 67	17.14
Bonilla Norte	S1	BX3	14.98	17 00	9 98	5 67	30 93
	S2	BY3	14.98	17 00	9 98	5.67	26.27
	S3	BY3	14.98	17 00	9 98	5.67	23 60
Bonilla Sur	S1	BY2	14.98	17 00	9.98	5 67	21 06
	S2	BY2	14 98	17.00	9 98	5.67	18.31
Farellones	S1	BY1	14 98	17 00	9.98	5 67	14.33
	S2	BZ1	14.98	17 00	9 98	5 67	13 87
	S3	BZ2	14.98	17 00	9 98	5 67	13 11
Salar del Carmen	S1	CZ2	14.98	17.00	9 98	5 67	12 49
	S2	CZ1	14 98	17.00	9.98	5 67	12.67
	S3	CZ1	14.98	17 00	9.98	5 67	10.18
La Cadena	S1	CZ1	30 57	34 70	20 38	11 57	21 52
	S2	CZ1	30 57	34.70	20 38	11.57	21 22
	S3	CZ1	30.57	34.70	20.38	11.57	20.41
El Ancla Norte	S1	AX3*	27.75	31.50	18 50	10 50	98.12
	S2	AX3	27 75	31 50	18 50	10 50	65 75
	S3	AY2	27 75	31.50	18.50	10.50	52 02
El Ancla Sur	S1	BY1	27 75	31 50	18 50	10 50	34 67
	S2	BY2	27 75	31 50	18 50	10 50	34 26
	S3	BY1	27 75	31 50	18 50	10.50	32 58
Riquelme	S1	AX2	29 16	33 10	19 44	11.03	83 45
	S2	AX3	29 16	33 10	19 44	11 03	76 76
	S3	AX3	29 16	33 10	19 44	11 03	68.04
Baquedano	S1	AX2	30 57	34 70	20 38	11.57	86.99
	S2	AX3	30.57	34 70	20.38	11 57	64.84
Uribe	S1	AX3	32 07	36 40	21 38	12 13	76.08
	S2	AX3	32 07	36 40	21 38	12 13	69 51
	S3	AY3	32 07	36 40	21 38	12 13	63 54
El Toro	S1	BY2	36 30	41 20	24 20	13 73	49.03
	S2	BY2	36 30	41 20	24 20	13.73	45 95
	S3	BY2	36 30	41 20	24 20	13.73	43 27
Caliche Norte	S1	AX3*	37 00	42.00	24 67	14 00	165 34
	S2	AX3*	37 00	42 00	24 67	14 00	103.92
	S3	AX3	37 00	42 00	24 67	14.00	88.49
Caliche Sur	S1	AX1	37 00	42 00	24 67	14 00	78.84
	S2	AY2	37 00	42 00	24 67	14.00	69 37
	S3	BY2	37 00	42.00	24.67	14 00	55.67
La Negra	S1	DZ1	37.00	42 00	24 67	14 00	14 00
	S2	DZ1	37.00	42 00	24 67	14.00	14 00
	S3	DZ1	37 00	42 00	24 67	14 00	14 00
U de Antofagasta	S1	AY1	37 00	42.00	24 67	14 00	60.37
	S2	BY1	37 00	42 00	24 67	14 00	53 74
Jardin del Sur	S1	BY1	37 00	42.00	24 67	14.00	38.47
	S2	BY1	37 00	42.00	24.67	14 00	36 85
	S3	CZ1	37 00	42 00	24.67	14 00	28 12
El Huascar	S1	BY1	37 00	42.00	24 67	14.00	43 32
	S2	BY1	37.00	42 00	24.67	14.00	38 18
	S3	BY1	37.00	42.00	24.67	14.00	36.41

TABLA 6.8 PRECIPITACIONES E INTENSIDADES DE LAS CUENCAS DE ANTOFAGASTA. PRESENTE ESTUDIO

Quebradas	Tipo	Pr(1.5 hr) (mm)	Pr(3 hr) (mm)	Im(1.5 hr) (mm/hr)	Im(3 hr) (mm/hr)	I(Tc) (mm/hr)
La Cadena Sector Alto	CZ1	30.57	34.70	23.13	11.57	25.40
La Cadena Antes Aflte N 1	CZ1	30.57	34.70	23.13	11.57	24.61
Afluente N1	BZ1	30.57	34.70	23.13	11.57	27.46
Afluente N2	BY2	30.57	34.70	23.13	11.57	29.53
Afluente N3	BY2	30.57	34.70	23.13	11.57	44.19
Afluente N4	BY2	30.57	34.70	23.13	11.57	36.30
S. Del Carmen N2-B	CZ1	14.98	17.00	11.33	5.67	13.48
S. Del Carmen N2 Sector Alto	CY1	14.98	17.00	11.33	5.67	14.81
S. Del Carmen Afluente N1	CY1	14.98	17.00	11.33	5.67	15.15
S. Del Carmen Afluente N2	AY2	14.98	17.00	11.33	5.67	26.42
S.Del Carmen N2	CZ1	14.98	17.00	11.33	5.67	13.19
S.Del Carmen o Caracoles	CZ2	14.98	17.00	11.33	5.67	12.45
El Toro	BY2	36.30	41.20	27.47	13.73	41.95
El Ancla	BY1	27.75	31.50	21.00	10.50	31.82
Del Guay	DZ1	37.00	42.00	28.00	14.00	14.00
De Mateo (ag. arr. Del Guay)	DZ1	37.00	42.00	28.00	14.00	14.00
De Mateo (ag. ab. Del Guay)	DZ1	37.00	42.00	28.00	14.00	14.00
De Mateo	DZ1	37.00	42.00	28.00	14.00	14.00
La Negra (en vertientes)	DZ1	37.00	42.00	28.00	14.00	14.00
La Negra (Sector Terminal 1)	DZ1	37.00	42.00	28.00	14.00	14.00
La Negra (Sector Terminal2)	DZ1	37.00	42.00	28.00	14.00	14.00

6.4.4 Análisis de Frecuencias

La longitud de la información disponible en las estaciones Co. Moreno y UCN, que abarca 23 años de estadística, posibilita la derivación de las curvas de frecuencias correspondientes para la precipitación máxima diaria, la que prácticamente coincide con el valor mensual.

Para el análisis se adopta, la serie anual de máximos, mostrada en la Tabla 6.9, que presenta 2 valores nulos en la estación Co. Moreno y 7 valores nulos en la estación UCN. Los resultados obtenidos sin incorporar información adicional a la de la muestra, se presentan en la Fig 6.8. Se observa una clara diferencia entre las curvas de ambas estaciones a partir del período de retorno 7 años, lo que conduce a inferencias distintas para el período de retorno T = 100 años: P^{100}_{24} = 47 mm con la de Co. Moreno y P^{100}_{24} = 180 mm con la de la UCN.

Con el fin de utilizar la información disponible en la estación Portezuelo y suponiendo que el valor mensual es igual al diario, para las tormentas menores (ver Tabla 6.10), se combina esta información con la disponible en las dos estaciones anteriormente analizadas, considerando que las muestras son homogéneas. En las Figs 6.9 y 6.10, donde se presenta los resultados obtenidos, se aprecia que el uso de la información conjunta conduce, a valores de P^{100}_{24}, 42 y 56,5 mm, reduciéndose las magnitudes y la diferencia entre los valores indicados anteriormente. De acuerdo con lo anterior, se estima que la información registrada en cualquiera de las estaciones de Antofagasta (Co. Moreno, DGA, UCN) debe ser usada para efectos de diseño, en conjunto con la información más antigua de la estación Portezuelo.

Sobre la base de la información consignada por Karzulovic (1991) en relación a las duraciones de los diez mayores temporales ocurridos desde 1903, que se presenta en la Tabla 6.11, es posible inferir las intensidades medias atribuibles a estos eventos, para cada una de esas duraciones. Tal como se aprecia en dicha tabla, la menor duración (3 horas) corresponde a la del evento de Junio de 1991 por lo que se estimó conveniente referir las intensidades medias de todos los eventos a dicha duración. Para ello se utilizó la fórmula de Grunsky:

$$I_{3,1} = I_{D,1} \ (D_i/3)^{0,5} \qquad (6.4)$$

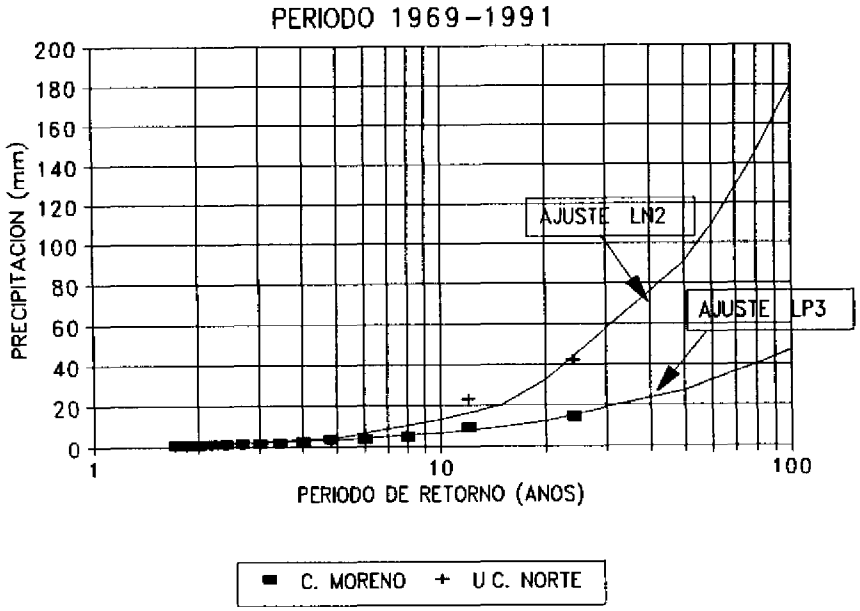


Fig 6.8 Curvas de Frecuencia

TABLA 6.9 PRECIPITACION DIARIA MAXIMA ANUAL (mm)

AÑO	Co. MORENO	UCN	AÑO	Co. MORENO	UCN
1969	3,7	6,4	1981	0,2	1,2
1970	1,6	0,0	1982	0,8	5,5
1971	1,1	1,2	1983	0,6	2,8
1972	0,5	1,5	1984	3,5	0,8
1973	0,8	0,0	1985	1,1	0,1
1974	2,3	0,6	1986	0,6	0,0
1975	1,2	1,7	1987	4,3	22,8
1976	9,1	0,0	1988	0,2	0,0
1977	1,0	0,0	1989	0,5	0,4
1978	0,4	0,3	1990	0,0	0,0
1979	0,4	0,3	1991	14,1	42,0
1980	0,0	2,0			