

R 43

43R



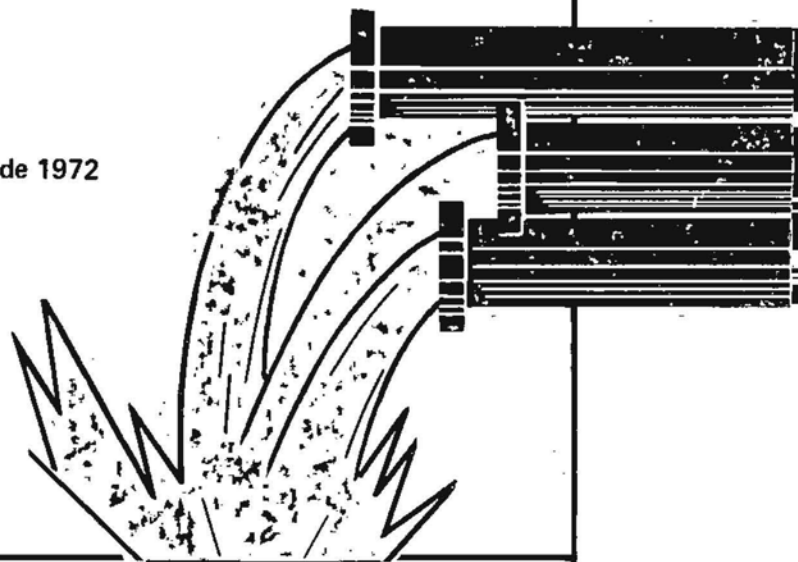
**CARACTERIZACION CLIMATOLOGICA
E
HIDROLOGICA
DEL SALAR DE ATACAMA**

CORFO

EDUARDO RAMIREZ GONZALEZ
(Ing. Civil)

Santiago, Junio de 1972

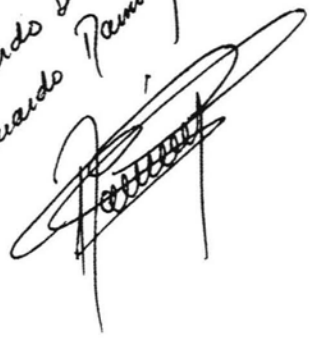
C-797c
1538
e-1



CORFO

DEPARTAMENTO DE RECURSOS HIDRAULICOS

Sept 13-Sept-72
Atte. al amigo
Gerardo Díaz del Río
de Eduardo Ramírez G.



Confidencial

C797c

1538

C.1

CARACTERIZACION CLIMATOLOGICA

E

HIDROLOGICA
DEL SALAR DE ATACAMA



Eduardo Ramírez González
(Ing. Civil)

Departamento de Recursos Hidráulicos

C O R F O

Informe preparado por la Sección Hidrología con la colaboración de las secciones técnicas de Construcción de Obras Hidráulicas e Hidrometría.

Junio de 1972.

01538

P R O L O G O

El autor desea expresar su especial agradecimiento a la desinteresada e importante colaboración recibida de los ingenieros Agustín Hojas B. y Jorge Orellana Q. en el estudio y análisis hidrogeológico de este informe como así también al ingeniero Fernando Peralta Toro por su atinada orientación, al ingeniero Fernando Rodríguez Roa y al señor Jaime Mendoza B. por su abnegada colaboración en el desarrollo de las diversas fases de este trabajo, a los señores dibujantes Sergio Hermosilla y Juan Castillo y a todos aquellos que de diversas formas contribuyeron a la realización de este trabajo.

I N D I C E

		<u>Pág.</u>
Capítulo 1	Introducción	1
1.1	Ubicación y Características	2
1.2	Objetivo	2
1.3	Conclusiones	3
1.4	Recomendaciones	6
Capítulo 2	Climatología	
2.1	Generalidades	7
2.2.	Exposición y Análisis de los antecedentes hidrológicos controlados en el Salar	8
2.2.1	Temperatura	9
2.2.2	Humedad Relativa	14
2.2.3	Radiación Solar	15
2.2.4	Vientos	15
2.2.5	Evaporación	16
2.2.6	Pluviometría	23
Capítulo 3	Hidrología	29
3.1	Caudales Superficiales	29
3.2	Análisis de Escorrentía	32
3.2.1	Escorrentía en función de la precipitación determinada por curvas isoyetas	32
3.2.2	Escorrentía en función de la expresión de Becerril	33
3.2.3	Estimación de la precipitación en función de la altura para el cálculo de la escorrentía	34
3.3	Análisis de Evaporaciones	41
3.3.1	Experiencias de evaporación realizadas en suelos salinos	41
3.3.2	Estimación de la evaporación en el Salar	43

		<u>Pág.</u>
Capítulo 4	Hidrogeología Cualitativa	46
4.1	Antecedentes	46
4.2	Acuíferos Reconocidos	46
4.3	Acuífero Freático	47
	4.3.1 Profundidad Nivel Estático	48
	4.3.2 Fluctuaciones de Niveles	50
	4.3.3 Recargas, Movimiento, Descarga	57
Capítulo 5	Balance de Aguas	65
5.1	Generalidades	65
5.2	Estimación de la entrada subterránea sobre la base de una constancia anual de los niveles estáticos	66
Capítulo 6	Anexos	71
	Precipitaciones Estación San Pedro	72
	Gastos Medios Mensuales Est. Cuchabrache	73
	Aforos Principales Afluentes	75
Capítulo 7	Referencias y Bibliografía	76

C A P I T U L O N O 1I N T R O D U C C I O N

El Salar de Atacama ubicado en la provincia de Antofagasta, representa una fuente importante de recursos de agua en la provincia donde este elemento es escaso y por tanto limitante para el desarrollo integral de sus actividades. La razón que confirma esta afirmación se pone de manifiesto al cuantificar mas de $1,5 \text{ m}^3/\text{seg}$ sólo en recursos superficiales que por las quebradas de los bordes oriental y norte ingresan al Salar producto de lluvias y nevadas en la zona altiplánica; fenómeno que se conoce como invierno boliviano.

De lo expuesto, se deduce que en la medida que se logre un mayor conocimiento de las reservas almacenadas y la magnitud de su recarga y descarga, permitirá preveer en el futuro su utilización en el desarrollo minero e industrial de la provincia.

El presente trabajo, pone de manifiesto la casi nula información que existe tanto de las entradas como salidas de agua en la hoya como también de otros parámetros hidrometeorológicos del área que permitan una acabada caracterización de estas variables hidrológicas. Sin embargo, este informe preliminar permite fijar ordenes de magnitud de los parámetros como así también, sobre la hipótesis de equilibrio en el sistema establece la cuantía de las entradas subterráneas asumiendo que las pérdidas por evaporación desde la costra salina igualan a las entradas totales del área.

Cabe destacar que, en los cálculos de entradas al embalse subterráneo y en general en el capítulo de escorrentía y balance de aguas de este informe, no se consideran los efectos que la precipitación del borde occidental produce en el proceso de recarga. Esto debido a lo escaso de su intensidad como se pone de manifiesto en curvas isoyetas del sector.

1.1. UBICACION Y CARACTERISTICAS.-

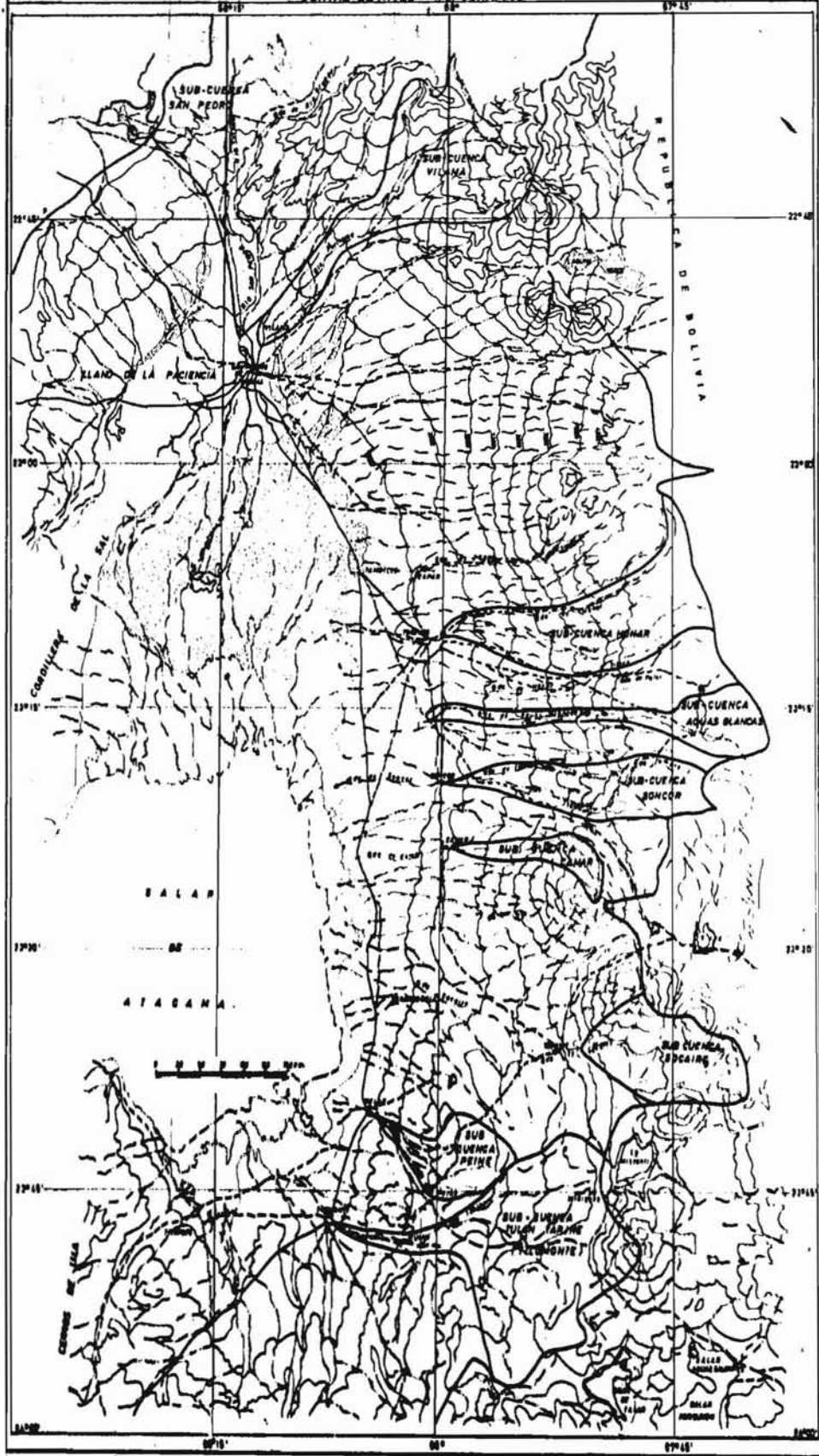
La hoya hidrográfica del Salar de Atacama se ubica en zona altiplánica en el sector oriental de la provincia de Antofagasta entre las latitudes 22° 20' y 24° 15' y longitudes 67° 45' y 68° 40', cubriendo una extensión de 15.000 Km² a una altura media de 2.600 mts. s.n.m.. El Mapa de la página siguiente, presenta la ubicación de las principales sub-cuencas de la hoya.

Su principal característica hidrográfica la constituye el ser una hoya cerrada, razón por la que ha sido clasificada con la nomenclatura 612 del Mapa Hidrográfico de Chile, donde el primer dígito la identifica como hoya sin drenaje exterior para sus aguas. Esta condición hidrográfica, ha permitido la formación de una extensa costra salina que cubre el área central de la hoya en una zona de 3099 Km² por efecto del proceso de evaporación de sus recursos hídricos desde épocas remotas.

1.2. OBJETIVO.-

El informe sobre "Características Climáticas e Hidrológicas en la hoya del Salar de Atacama" que se presenta, tiene como objetivo fundamental establecer el orden de magnitud y comportamiento medio de las variables hidrológicas, como asimismo realizar una descripción de la hidrogeología del área; y a través de la formulación de la hipótesis de equilibrio del Sistema, establecer la magnitud de las entradas al embalse subterráneo.

BORDE ORIENTAL - SALAR DE ATACAMA
SUB CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE LOS PRINCIPALES AFLUENTES
CURVAS DE NIVEL TOPOGRÁFICO



1.3. CONCLUSIONES.-

De los antecedentes analizados, se puede establecer las siguientes características de las variables hidrológicas en valores medios.

1.- La temperatura anual alcanza a 14.1°C con una amplitud de oscilación térmica de 20.7°C entre la media máxima de 24.8°C y la media mínima de 4.1°C .

2.- La humedad relativa anual según el psicrómetro es de 54.7%.

3.- La intensidad media anual de los vientos es de 35.0 Km/ hora.

4.- La evaporación potencial según expresiones empíricas de Meyer llega a 2.130 mm/año.

5.- El gasto medio que ingresa superficialmente al Salar representa 1677 l/s. aguas arriba de las áreas de cultivo ($53,2 \text{ Hm}^3/\text{año}$).

6.- La precipitación en la hoya del Salar cae fundamentalmente en el área de los bordes Norte y Oriental sobre una superficie de 5427 Km².

7.- De la relación altura-precipitación se concluye que la intensidad media de precipitación es del orden de 110 mm. al año lo que representa un volumen anual de 597 millones de metros cúbicos.

Sin embargo en el total del área de las hoyas analizadas vale decir sobre 2911 Km² el volumen precipitado sería de $322 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$.

8.- De acuerdo al análisis de escorrentía, un 12,6% de la precipitación escurriría superficialmente hasta las cabeceras de las áreas de cultivo. Vale decir $40,5 \text{ Hm}^3/\text{año}$. Significando con ello que la diferencia de $12,7 \text{ Hm}^3$ con respecto a lo indicado en el punto 5 proveniría de aportes subterráneos de áreas ajenas a la hoya del Salar.

9.- El volúmen evaporado desde los distintos tipos de costra salina en un área de 3.099 Km² de acuerdo a extrapolaciones realizadas con experiencias en la Pampa alcanzaría a 202,7 Hm³ equivalentes a 6,4 m³/seg.

10.- Las entradas subterráneas evaluadas según la hipótesis de un equilibrio entre entradas y salidas del sistema serían de 133,70 Hm³ equivalentes a 4245 lts./seg.

11.- Las entradas superficiales descontando un 40% por uso consumo en las áreas de cultivo aguas abajo de los puntos de control serían de 31,9 Hm³ equivalentes a 1005 lts/seg.

12.- La entrada por precipitación en el área de la costra salina con intensidad media de 12,0 mm/año asciende a 37,1 Hm³.

13.- El rendimiento global de la lluvia caída en hoyas con escorrentía superficial es de un 32,3%. Cifra que resulta de la suma del porcentaje de escorrentía subterránea (22,4%) y la escorrentía superficial neta (9,9%) que ingresa al sistema.

14.- La escorrentía en quebradas sin escurrimiento superficial continuo visible, es de un 22,4% el valor de la precipitación media del período hidrológico considerado.

15.- Frente a todos los valores de escorrentía subterránea indicados, es necesario tener presente que:

- a) Pueden ser reflejo de condiciones hidrológicas remotas y distintas a las actuales.
- b) Se han calculado suponiendo invariable el almacenamiento subterráneo. De existir una disminución de almacenamiento (como la inferida en algunos registros), la magnitud de la escorrentía subterránea decrece significativamente.

En cuanto a características hidrogeológicas y analizado exclusivamente el acuífero freático, puede concluirse que:

9.- El volúmen evaporado desde los distintos tipos de costra salina en un área de 3.099 Km² de acuerdo a extrapolaciones realizadas con experiencias en la Pampa alcanzaría a 202,7 Hm³ equivalentes a 6,4 m³/seg.

10.- Las entradas subterráneas evaluadas según la hipótesis de un equilibrio entre entradas y salidas del sistema serían de 133,70 Hm³ equivalentes a 4245 lts./seg.

11.- Las entradas superficiales descontando un 40% por uso con sumo en las áreas de cultivo aguas abajo de los puntos de control se rían de 31,9 Hm³ equivalentes a 1005 lts/seg.

12.- La entrada por precipitación en el área de la costra salina con intensidad media de 12,0 mm/año asciende a 37,1 Hm³.

13.- El rendimiento global de la lluvia caída en hoyas con es correntia superficial es de un 32,3%. Cifra que resulta de la suma del porcentaje de es correntia subterránea (22,4%) y la es correntia superficial neta (9,9%) que ingresa al sistema.

14.- La es correntia en quebradas sin es currimiento superficial continuo visible, es de un 22,4% el valor de la precipitación media del período hidrológico considerado.

15.- Frente a todos los valores de es correntia subterránea in dicados, es necesario tener presente que:

- a) Pueden ser reflejo de condiciones hidrológicas remotas y distintas a las actuales.
- b) Se han calculado suponiendo invariable el almacenamiento subterráneo. De existir una disminución de almacenamiento (como la inferida en algunos registros), la magnitud de la es correntia subterránea decrece significativamente.

En cuanto a características hidrogeológicas y analizado exclu sivamente el acuífero freático, puede concluirse que:

16.- El nivel freático se encuentra muy próximo a la superficie en la totalidad del Salar. Puede decirse que en toda la zona en que se presenta costra, su profundidad es inferior a 4 mts. (plano de isoprofundidad.)

17.- Los gradientes hidráulicos son excepcionalmente fuertes para las condiciones meteorológicas de la zona, debido a la corta distancia existente entre las zonas de recarga y descarga. Su valor puede ser enrangado entre 4 o/oo y 1%.

18.- Se presentan fluctuaciones estacionales de importancia en el nivel freático, cuyos máximos y mínimos coinciden en el tiempo en todas las zonas del Salar.

Estas fluctuaciones son más importantes, cuanto menos profundo se encuentra el nivel, por lo que se asocian a descarga de agua subterránea y que, en la zona reconocida y por el período de ocurrencia, sería más importante el consumo vegetativo de freatófitas.

19.- A pesar del corto período de registro, se observa una tendencia general de descenso que puede interpretarse como un déficit de recarga, situación que no se observa en el área Norte y queda bajo la influencia del riego de los ayillos.

20.- El período de tiempo que toma el escurrimiento desde las supuestas zonas de recarga hasta el Salar, es del orden de cientos de años. Se calcularon 500 años desde la salida de Chaxas hasta su descarga.

21.- Asignando una fluctuación anual de nivel de 20 cm. como promedio a toda la zona de descarga y un coeficiente de almacenamiento de 10%, se obtiene un aumento de volúmen descargado de 55 Hm³ por año. Ello representa un límite inferior del volúmen total anual descargado por evaporación y transpiración.

22.- El acuífero freático de Tilopozo no tiene importancia como portador de agua.

1.4. Recomendaciones.-

A fin de comprobar o rechazar las hipótesis que permitieron estimar algunas de las variables hidrológicas, es necesario:

- 1.- Instalar al menos 3 estaciones meteorológicas, que en principio sería: Tumbre, Socaire y Tilomonte.
- 2.- Efectuar mediciones de evaporación directa del Salar en 4 puntos con distintas características de costra y profundidad del nivel estático, a través de la instalación de las respectivas estaciones evaporimétricas.
- 3.- Realización de corridas de aforo en las 4 quebradas de mayor importancia: Aguas Blancas, Homar, Socaire y Tilomonte. Junto a ello, efectuar un nuevo reconocimiento de los actuales puntos de aforo de la totalidad de las quebradas.
- 4.- Continuar con el control fluviométrico de las quebradas en los puntos que se recomiendan en 3.
- 5.- Mantener el control de variación de almacenamiento del acuífero, con las mediciones en los pozos de observación. Estas medidas deberán efectuarse con huincha de acero.
- 6.- Mantener un control estricto de los afluentes mas importantes, el río San Pedro y el Vilama

C A P I T U L O N O 2C L I M A T O L O G I A2.1. Generalidades.-

La ubicación geográfica del Salar le da características especiales en cuanto a su clima. Por su altitud, lejanía del mar y sequedad del aire, presenta importantes variaciones de temperaturas en el día.

Por su latitud le corresponde en período de Abril a Noviembre un clima desértico con precipitaciones prácticamente nulas debido a la presencia cercana (lat. 30° Sur), del cinturón de altas presiones subtropical que da gran estabilidad climática y que en el Océano se concentra en un núcleo conocido como Anticiclón del Pacífico. Sin embargo, en el período estival este cinturón sufre un desplazamiento hacia latitudes mayores, dando paso en la zona altiplánica a la penetración del Frente Ecuatorial de bajas presiones el que por efecto de la distribución no homogénea de mares y continentes, sufre un desplazamiento desde su posición ecuatorial hacia el Sur, dando lugar de esta forma a situaciones de inestabilidad atmosférica en el altiplano con corrientes ascendentes de aire y formación de nubes cumuliformes. Este fenómeno que alcanza a nuestro territorio hasta una latitud de 25° en el borde oriental, es conocido como invierno boliviano. En este período ocurren importantes precipitaciones las que en la alta cordillera se depositan en forma de nieve.

La situación climática producto de los fenómenos atmosféricos descritos, puede ser considerada según la clasificación de Köeppen diferenciada en dos clases:

- a) Clima Desértico Normal que corresponde al área misma del Salar, se caracteriza por tener una temperatura media mensual inferior a los 18° con precipitaciones de escasa importancia por su gran dispersión y corta duración y humedades relativas bajas que alcanzan a valores de 45%, cifra que seguramente debe corresponder

a la del Salar.

- b) Clima Desértico Marginal de Altura se presenta sobre los 3000 metros, en el borde oriental y Norte del Salar cuya característica principal se manifiesta con temperaturas medias anuales del orden de 11° y humedades relativas inferiores al 45%.

En cuanto a las precipitaciones, estas ocurren en los meses de verano debido a fenómenos de origen convectivo por calentamiento estival de la cordillera.

2.2.- Exposición y Análisis de los antecedentes hidrológicos controlados en el Salar.

El Salar de Atacama al que fluyen numerosas quebradas, algunas de ellas de escasa importancia por la cuantía de sus caudales, se encuentra muy abandonado de antecedentes. Existen en la hoya dos estaciones fluviométricas y dos estaciones meteorológicas estas últimas ubicadas en el mismo pueblo de San Pedro de Atacama.

Las estaciones fluviométricas se ubican una en el río San Pedro, antes de la zona de regadío del Sector denominado Cuchabrache de propiedad de la Dirección General de Aguas (DGA) la que cuenta con registros limnigráficos desde 1963 y aforos aislados más o menos continuados a partir de 1947. La segunda estación fluviométrica corresponde a una sección Parshall instalada por CORFO en 1969, cerca de la desembocadura de la quebrada Aguas Blancas la que cuenta con un control limnigráfico desde entonces. El resto de las quebradas disponen de aforos aislados hasta Octubre de 1970 siendo controlados mensualmente por CORFO a partir de esa fecha.

Las estaciones meteorológicas existentes son de propiedad de la Oficina Meteorológica y de la DGA. La primera de ellas ubicada junto al Museo Arqueológico, cuenta con registros pluviométricos, horas de sol, temperaturas extremas, evaporación y humedad relativa. La segunda instalada en el Campamento de la Dirección de Riego, registra valores de precipitación, evaporación y ve-

locidad del viento. Conjugando estos antecedentes que a partir de 1959 se controlan con cierta periodicidad se hará un análisis de la situación hidrológica. Evidentemente este análisis no puede pretender ser una versión definitiva de su realidad. La carencia de información impide extrapolar en forma más real los antecedentes que se consideraran en el resto del Salar. Las extrapolaciones se harán pues sólo a modo de tener un índice de magnitud de las variables hidrológicas en el resto de la zona y no tendrán otro sentido que el indicado. A continuación se hará una caracterización de los principales parámetros hidrológicos de acuerdo a los antecedentes disponibles.

2.2.1. Temperatura.-

La fuerte radiación de la zona (aprox. 450 cal/cm²/día) consecuencia de la falta de nubes ($\frac{1}{10}$ a $\frac{2}{10}$ de cielo cubierto según valores medios dados por E. Almeyda) trae consigo una gran amplitud de temperaturas diarias que alcanzan a una cifra media anual de 20,7° entre sus valores máximo y mínimo según los antecedentes de la estación meteorológica de San Pedro. Valor que seguramente será mayor para zonas ubicadas en el centro del Salar.

Los antecedentes registrados desde 1959 en relación a temperaturas, indican un promedio anual de 14,1° C. para la zona de San Pedro y valores de 4,1° C. y 24,8 ° C. para las temperaturas medias extremas como se indica en las tablas 1, 2 y 3. En el Gráfico N° 1 se presenta la variación mensual de estas magnitudes. Se observa que de Abril a Septiembre ocurren las temperaturas más bajas del año conservándose una amplitud térmica prácticamente constante a través de los distintos meses de 20,7° C. entre las temperaturas máximas y mínimas.

T A B L A N O 1

T E M P E R A T U R A S M E D I A S (° C).

Estación San Pedro de Atacama Altura 2.436 mts. s.n.m.

MES	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	Valor P.Men.
E	17.6	18.1	18.1	17.9				19.1	18.6	18.6	17.9	18.2
F	18.3	17.5	17.9	17.7				18.3	18.4	18.0	18.5	18.1
M	19.2	15.6	16.9	16.3				17.0	17.2	16.5	17.6	17.1
A	13.8	14.3	12.9	13.6				14.2	15.7	12.9	15.0	14.1
M	14.0	14.9	10.7	10.9				10.7	12.6	10.6	11.3	11.9
J	(11.4)	8.5	8.5	6.8			9.0	8.5	8.0	8.3	6.6	8.0
J	8.8	7.5	8.1	7.8			8.7	7.3	9.2	8.3	8.0	8.2
A	9.7	10.6	11.5	(11.0)			10.0	9.4	10.4	10.8	(11.3)	10.3
S	13.7	12.7	12.5	14.2			12.1	(12.7)	14.1	13.6	14.5	13.4
O	15.8	14.7	16.0	14.3			15.4	16.1	(15.3)	15.6	15.6	15.4
N	16.4	17.1	17.4	16.9			16.7	17.1	16.6	17.0		16.9
D	18.2	18.2	18.2				18.7	17.8	17.4	17.7		18.0
PROMEDIO												14.1

() = Valores extrapolados

Los valores medios mensuales para cada año ha sido calculado en base a la fórmula:

$$T = \frac{T_{08} + T_{19} + T_{\text{máx}} + T_{\text{mín.}}}{4}$$

Del cuadro se observa que la amplitud térmica de las temperaturas medias anuales es de 10.2°C. Esto marca una diferencia con clima de la costa que corresponde a una amplitud de 5.5°C. (Iquique) debido a la acción moderadora del mar.

Los cuadros siguientes indican las temperaturas medias extremas en San Pedro de Atacama de acuerdo a los registros de la estación de la OMC.

T A B L A = N^o 2

T E M P E R A T U R A S M E D I A S M A X I M A S

MES	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	Pomed. Mensual
E	27.8	28.5	27.0	29.7			--	29.3	--	--	28.4	28.5
F	27.2	28.8	28.7	30.1			--	28.5	--	28.1	27.7	28.5
M	26.3	27.1	27.8	28.8			--	27.6	--	27.0	28.3	27.7
A	(24.2)	25.9	25.1	25.5			--	25.2	--	22.8	25.4	24.9
M	22.2	21.7	22.8	23.2			--	--	--	20.2	22.3	22.1
J	(21.2)	20.5	20.8	18.8			20.1	--	--	17.4	18.6	19.4
J	20.3	15.9	21.0	17.4			19.3	--	--	18.7	19.5	18.9
A	21.1	22.4	24.1	21.3			20.7	--	--	21.5	(22.1)	22.0
S	25.1	25.1	23.9	25.2			21.5	--	--	23.8	24.7	24.2
O	25.8	25.7	27.6	24.9			25.5	--	--	25.4	25.3	25.7
N	26.2	28.1	28.8	26.9			26.7	--	--	27.0		27.3
D	28.4	28.9	29.4	28.8			28.9	--	--	28.3		28.8
PROMEDIO ANUAL												24.8

() = Valores interpolados

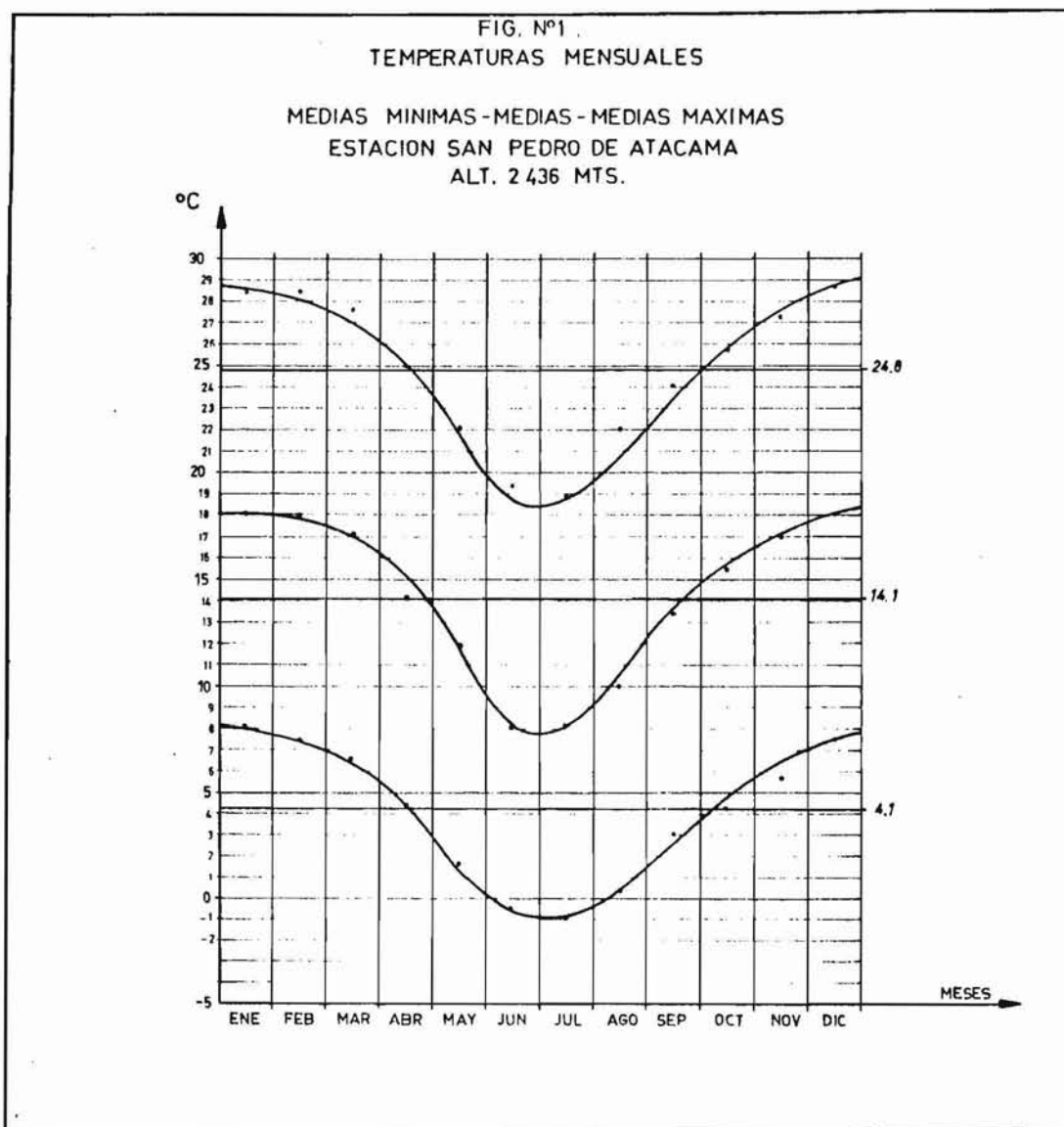
T A B L A = N° 3 =T E M P E R A T U R A S M E D I A S M I N I M A S

MES	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	Prom. Mens.
E	5.9	8.2	10.1	6.7			--	8.0	7.8	9.2	8.6	8.1
F	9.2	6.4	7.9	7.3			--	7.8	10.1	9.1	9.4	7.5
M	7.0	4.4	6.6	6.1			--	7.1	7.5	7.0	7.8	6.7
A	(4.0)	3.9	2.6	4.2			--	4.7	7.3	3.4	5.0	4.4
M	1.0	1.8	1.6	1.1			--	1.6	3.9	2.0	1.2	1.8
J	(0.7)	1.5	-0.7	-3.1			0.3	-0.7	-1.1	0.7	-0.7	-0.4
J	0.4	1.7	-2.0	-1.7			1.0	-2.7	0.5	-1.2	-1.4	-0.8
A	0.1	0.2	1.3	--			1.2	-0.8	-0.2	0.7	(1.3)	0.4
S	2.9	2.8	2.1	3.9			2.9	2.4	4.1	2.8	4.0	3.1
O	4.5	3.5	4.2	2.9			4.5	5.6	4.9	4.5	4.9	4.3
N	4.4	4.5	5.6	6.1			5.8	6.0	5.3	7.1		5.6
D	6.9	6.7	7.2	7.4			7.7	6.0	7.3	7.1		7.3
PROMEDIO ANUAL												4.1

() = Valores interpolados

La amplitud de las oscilaciones térmicas medias en cada mes definidas como la diferencia entre las temperaturas medias máximas y medias mínimas se dan en el cuadro adjunto:

E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Amplit. media
20.4	21.0	21.0	20.0	20.4	19.9	19.5	21.4	21.1	21.4	21.7	21.8	20.8



Se observa que la dispersión de valores mensuales respecto de su valor medio 20.8 es baja, en cambio su amplitud promedio es bastante marcada debido a que la capacidad de absorción de calor de la atmósfera es muy limitada por las humedades relativas pequeñas. Esto marca diferencias de temperatura entre día y noche importantes.

2.2.2. Humedad relativa.-

La humedad relativa controlada en San Pedro de Atacama por la Oficina Meteorológica alcanza un promedio anual de 44,9% de acuerdo a la estadística que se indica en la tabla 4. Sin embargo considerando el cálculo de la humedad relativa en base a tablas psicrométricas, como la diferencia entre las temperaturas de un termómetro seco y otro húmedo se obtiene un promedio anual de 54.7% en la estadística del cuadro 5. Vale decir superior en un 21,8% al anotado como humedad relativa media anual. Ahora bien, por no contar con más antecedentes sobre la forma de obtención de los valores mensuales del cuadro 4 se considerará como humedad relativa media anual el valor de 54.7% obtenido de las tablas psicrométricas en la forma antes indicada y como valores medios mensuales los indicados en el cuadro 5.

T A B L A N º 4

HUMEDADES RELATIVAS OBTENIDAS POR LA OFICINA METEOROLOGICA												Prom.	
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
1959	53.7	59.5	62.7	56.0	56.5	59.0	54.5	49.5	46.0	50.8			
1960	60.2	40.0	41.8	44.2	60.0	38.2	38.8	40.2	38.2	37.0	46.2		
1961	62.2	54.0	48.0	39.2	42.0	35.0	35.0	34.8	34.0	34.0	44.0	50.9	
1962	49.1	46.9	43.8	37.6	30.9	31.4	40.0						
PROM.	56.3	49.9	49.1	44.2	43.1	42.1	43.0	42.0	41.2	39.4	40.5	49.0	44.9

HUMEDADES RELATIVAS OBTENIDAS EN BASE A DATOS DEL METEOROLOGICO Y
CALCULADAS POR CORFO MEDIANTE TABLAS PSICROMETRICAS

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Prom.
1959	59.2	64.0	65.7	61.0	60.9	61.9	55.5	55.5	50.5	51.8	50.8		
1960	63.7	46.2	47.9	48.8	59.1	60.0	60.6	59.4	52.2	49.7	47.1	55.9	
1961	68.1	58.5	55.5	49.7	48.7	49.0	46.2	47.7	47.8	47.1	54.2	57.9	
1962	55.3	53.9	53.1	47.3	43.9	48.1	50.4						
1965			66.7	65.8	64.1	53.9	60.9	66.8	65.3	48.7	41.6	51.2	
PROM.	61.5	55.7	57.8	54.5	55.3	52.7	56.0	57.3	55.2	49.0	48.8	52.9	54.7

2.2.3. Radiación Solar.-

De radiación solar no se tienen antecedentes en la hoya del Salar sin embargo datos tomados por CHILEX en el Salar de Talabre cerca de Calama de altitud similar a San Pedro, puede dar un índice de su intensidad.

Estación : Salar de Talabre

Latitud 22° 23' Longitud 68° 48'

Altura: 2.300 Mts.

E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
570	520	450	350	320	340	400	500	580			

Valores medios en cal/cm²/día, obtenidos del informe Hidrológico del Loa - U. de Chile - CORFO

2.2.4. Vientos.-

Su dirección dominante corresponde a vientos provenientes del oeste. Los antecedentes entregados por la Sección Hidrometría de la

DGA en base a un anemómetro FUESS instalado en Marzo de 1969 en la localidad de San Pedro de Atacama, permiten deducir el cuadro de velocidades que sigue:

	A	M	J	J	A	S	O	N
Kilometraje del viento/mes s/DGA	27.050	23.250	27.700	21.100	23.500	26.100	30.820	25.530
Velocidad Km/h	37.6	32,3	38,5	29.3	32.6	36.2	42.8	35.0
Velocidad nudos	20.9	18.0	14.0	16.3	18.1	20.1	23.7	19.5

Valores que no reflejan ninguna tendencia. Tomando el promedio de ellos, se tendrá una cifra más representativa.

Velocidad media del viento = 19.8 (nudos) a 40 cm. del suelo.

Los antecedentes presentados hasta este punto, indican la presencia de un poder evaporante atmosférico importante, que se manifiesta en los registros de evaporación que se analizarán más adelante.

2.2.5. Evaporación.

El análisis del fenómeno de evaporación en la hoya del Salar se centrará en la determinación de la evaporación potencial.

Se define como evaporación potencial, aquella que tiene lugar para un determinado poder evaporante de la atmósfera desde una superficie que proporcione el total de agua que requiera el déficit higrométrico del ambiente.

Existe en la zona un evaporímetro Standar Weather Bureau Clase A que determina en cierto modo esta variable. En general todos los instrumentos de este tipo se ven afectados por condiciones locales de re calentamiento de las paredes del estanque lo que se traduce en medidas superiores a la evaporación potencial que determina el poder evaporante. Será preciso entonces calcular un coeficiente correctivo de estos valores.

En la tabla N^o 6 que sigue, se presentan los datos de evaporación medidos por Dirección de Riego en la zona, de de un estanque W.B. clase A. La Oficina Meteorológica dispone de algunos antecedentes de evaporación los que coincidiendo con los presentados por la D. de Riego son incompletos. Por esta razón se prescindirá de ellos.

T A B L A N º 6

EVAPORACION MENSUAL DESDE UN EVAPORIMETRO CLASE A (mm)

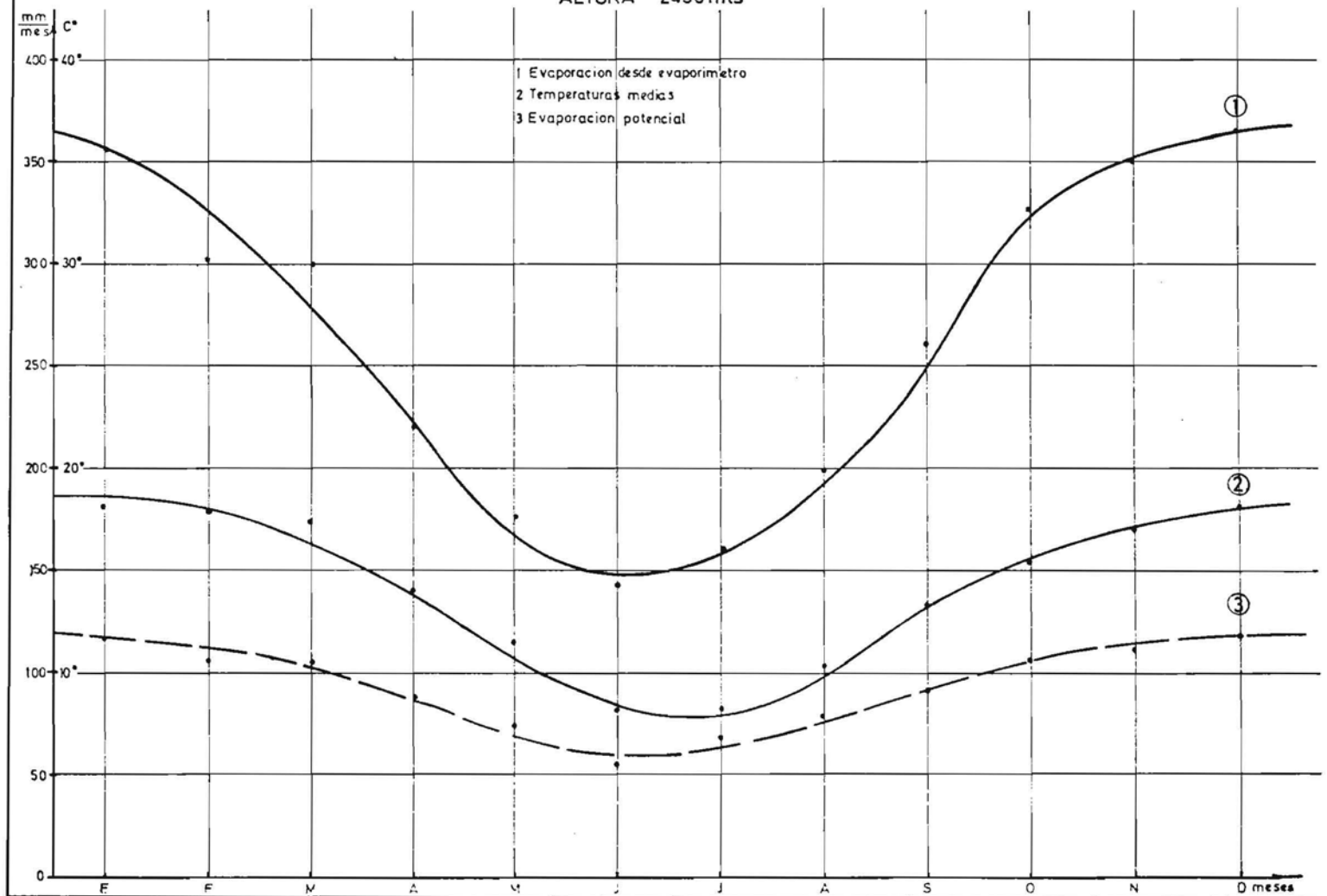
EST. SAN PEDRO DE ATACAMA

ALT.: 2.436 mts.

AÑO	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1963								193.0	257.5	318.9	340.5	369.9
1964	383.6	322.6	292.0	235.0	170.4	121.1	142.8	190.3	244.6	320.5	360.1	343.3
1965	329.1	309.2	294.0	231.0	184.4	129.9	187.7	194.8	258.9	267.5	356.2	354.8
1966	387.6	328.2	318.0	265.6	168.1	161.6	165.6	210.4	252.1	307.6	328.8	373.0
1967	364.5	267.1	298.9	223.7	189.0	144.2	166.9	204.1	256.2	312.2	337.2	371.0
1968	330.1	290.5	282.5	213.3	170.8	141.8	154.5	210.2	267.3	342.8	362.1	382.0
1969	358.9	310.0	326.3	234.9	189.8	153.6	155.9	198.7	294.2	333.0	360.5	362.2
1970	335.7	290.5	281.3	136.3	165.9							
FROM.	355.6	302.6	299.0	220.2	176.9	142.0	162.2	200.2	261.7	328.9	349.3	365.1
E.M.D.	11.5	10.8	9.6	7.3	5.7	4.7	5.2	6.5	8.7	10.6	11.6	11.7

E. M.D. = Evaporación media diaria.

Fig. 2
 EVAPORACIONES POTENCIAL-DESDE EVAPORIMETRO
 TEMPERATURAS MEDIAS.
 ESTACION SAN PEDRO DE ATACAMA
 ALTURA 2436 mts



Esta evaporación que para un año medio significa 3163.7 mm. anuales, es bastante superior a la potencial por efecto de recalentamiento antes mencionado. Esto queda de manifiesto en el gráfico N°2 donde las variaciones de temperatura siguen análoga variación mensual que la evaporación detectada por el evaporímetro. Es necesario entonces determinar un Coeficiente de Embalse definido como la razón entre la evaporación dada por el poder evaporante y la registrada por el evaporímetro.

En la determinación de la evaporación potencial se consideró la expresión empírica dada por Meyer:

$$E_M = C e_s (1 - HR) \left(1 + \frac{W}{10}\right) \quad \text{con } C = 11$$

En que:

- E_m = evaporación potencial mensual en milímetros
- HR = humedad relativa media mensual en %
- e_s = tensión de vapor saturante (en mm), correspondiente a la temperatura media mensual del aire en °C
- C = Coeficiente empírico igual a 15 para estanques de evaporación y 11 para embalses o lagos.
- W = velocidad media mensual del viento (millas por hora)

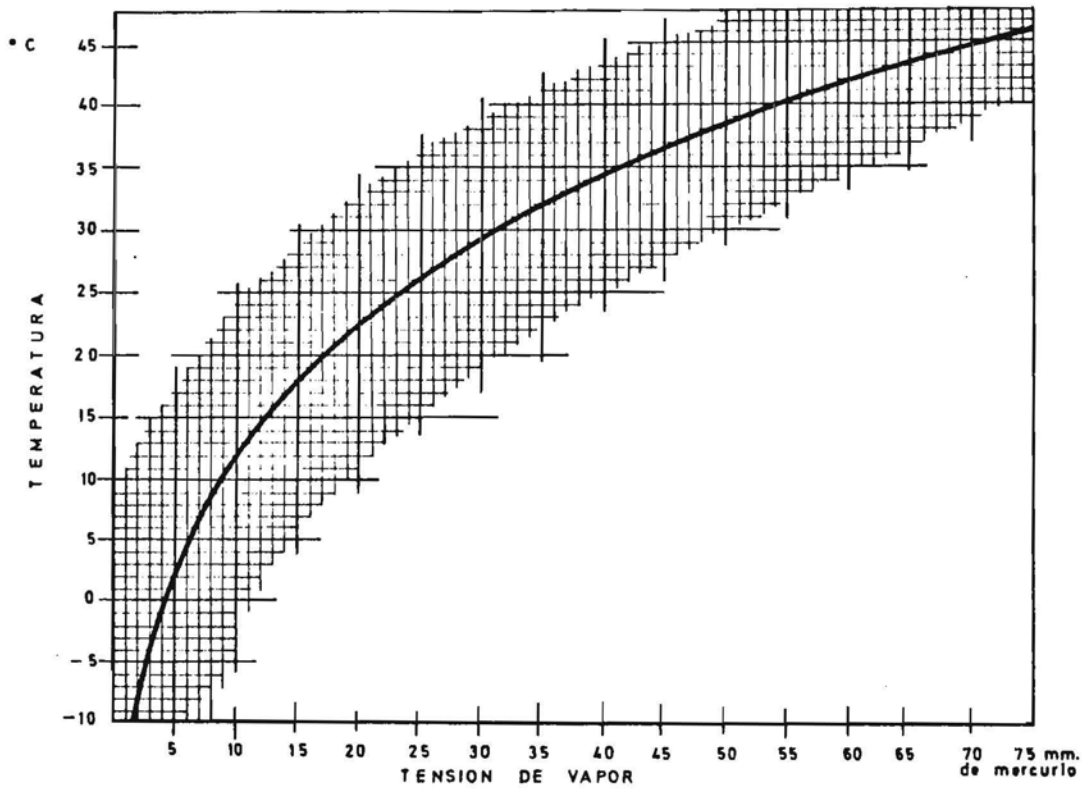
La metodología de cálculo de esta variable es la siguiente:

El gráfico N° 3 define la tensión de vapor saturado para los valores medios de temperatura dadas por la tabla N° 1. De la tabla N° 5 se obtienen las humedades relativas medias mensuales y como velocidad de viento se consideró el valor medio $19.8 \approx 20$ nudos determinado anteriormente.

En base a estos antecedentes resulta el cálculo de evaporación potencial que se indica en la tabla N° 7 siguiente.

FIG. Nº 3

TENSION DE VAPOR SATURADO



T A B L A N O 7

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T _o Media (en °C)	18.2	18.1	17.2	14.1	11.5	8.0	8.2	10.3	13.4	15.4	16.9	18.0
Tens. Vap. Sat.	15.2	15.1	14.1	11.5	9.5	7.5	7.7	9.0	11.0	12.6	14.0	15.0
H. Relat. (HR)	61.5	55.7	57.8	54.5	55.3	52.7	56.0	57.3	55.2	49.0	48.8	52.9
1 - HR	0.38	0.44	0.42	0.45	0.44	0.47	0.44	0.42	0.44	0.51	0.51	0.47
$1 + \frac{W}{10}$	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
$(1 - HR) \left(1 + \frac{W}{10}\right)$	1.14	1.32	1.26	1.35	1.32	1.41	1.32	1.26	1.32	1.53	1.53	1.41
Evaporac. ^o (mm)	192	220	198	174	141	118	113	127	167	212	236	236

∴ Evaporación potencial anual 2130 mm.

Suponiendo que la expresión empírica de Meyer se ajusta a una real evaluación de la evaporación potencial de la zona, podría definirse el coeficiente de embalse para el evaporímetro Weather Bureau como la razón entre lo expresado por Meyer y lo medido mensualmente en el evaporímetro de la Dirección de Riego.

Así, para cada mes resultan los valores siguientes:

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Evap. Meyer	192	220	198	174	141	118	113	127	163	212	236	236
Evap. W.B.	356	303	299	220	177	142	162	200	262	329	349	361
Coef. Embalse %	53.9	72,5	66.0	79.0	79,6	83.1	69.6	63,5	62.4	65.0	67.4	65.0

C.E. medio = 68.9%

Este es el factor correctivo de las medidas obtenidas desde el evaporímetro standar clase A para San Pedro de Atacama, debido al recalentamiento de las paredes del estanque.

2.2.6. Pluviometría.-

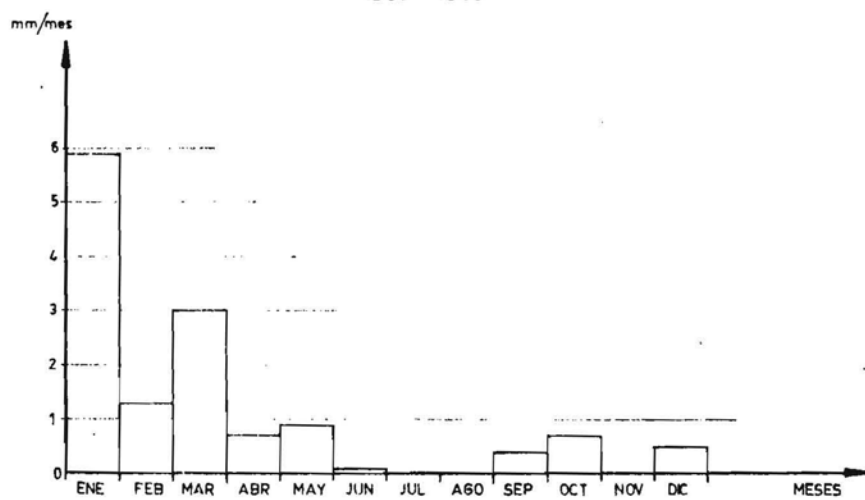
El régimen de precipitaciones como se indicó en la caracterización general del clima, corresponde a lluvias estivales en la alta cordillera provocadas por la presencia del frente ecuatorial de bajas presiones en la zona altiplánica.

Los únicos antecedentes sobre precipitaciones en la hoya del Salar corresponden a los datos medidos en la estación meteorológica de San Pedro de Atacama ubicada a 2.436 mts. s.n.m. a 22° 56' de latitud y 68° 13' de Longitud. La estadística mensual controlada desde 1958 se indica en el anexo 1 y en el histograma de la figura 4. En el se aprecia que las precipitaciones a nivel de la estación ocurren en cualquier época del año en cantidades poco importante e irre

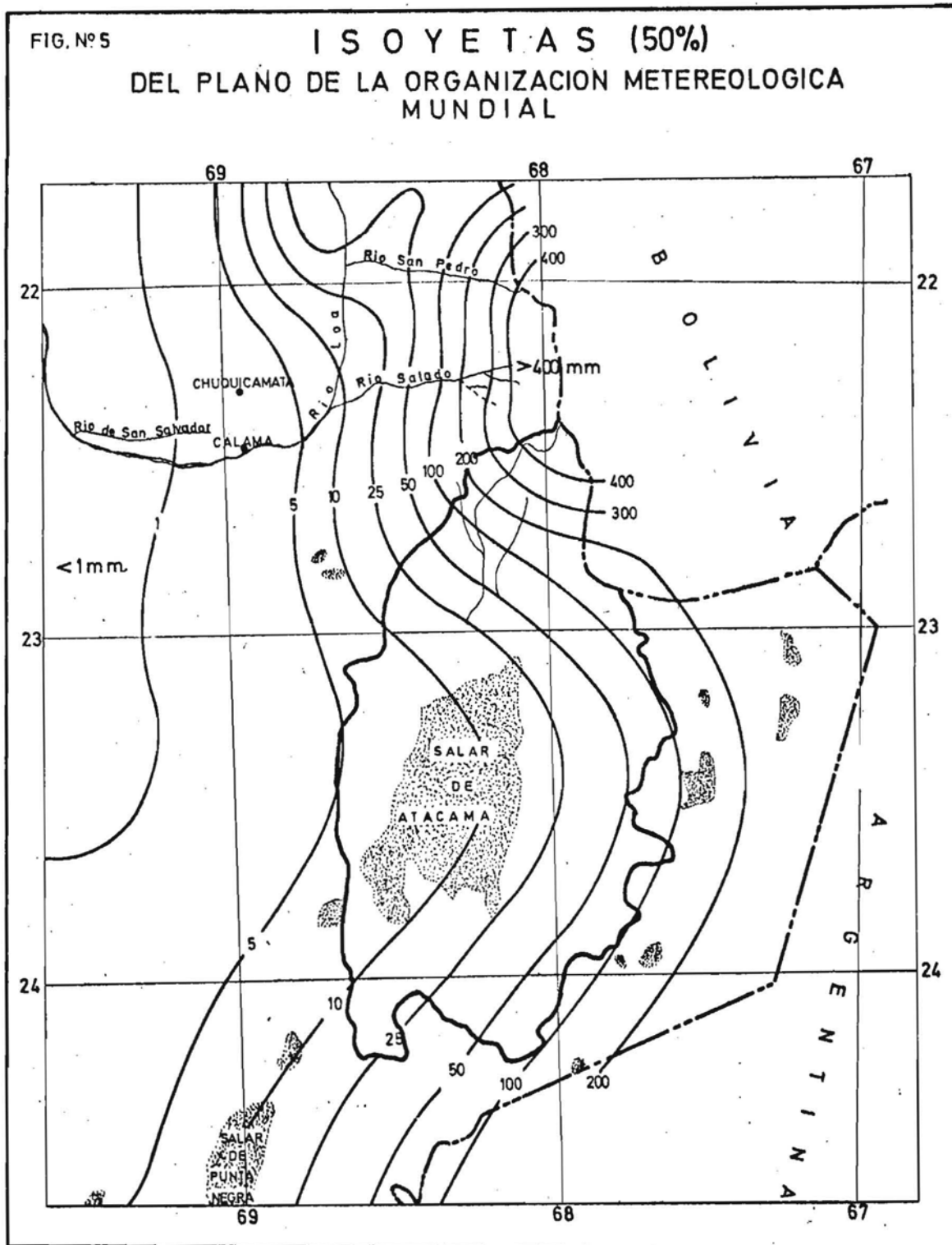
FIG. N° 4

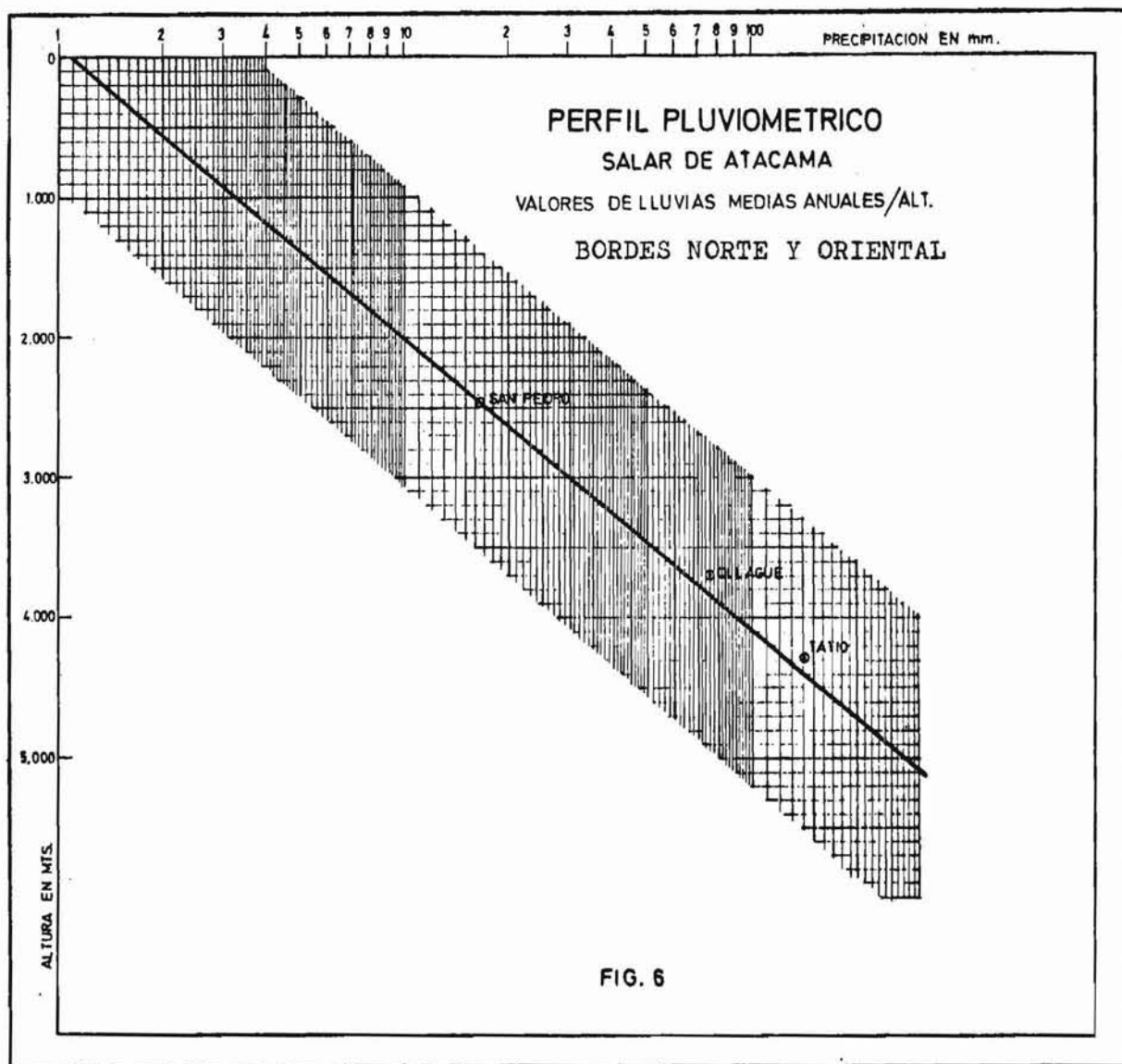
ESTACION SAN PEDRO DE ATACAMA
HISTOGRAMA PLUVIOMETRICOVALORES MEDIOS MENSUALES
EN 12 AÑOS DE ESTADISTICA

1958 - 1969



gularmente a través de los años. Sin embargo, en general éstas se presentan con mayor frecuencia en los meses de Diciembre a Marzo período que se conoce como invierno boliviano. Antecedentes sobre su cuantía existen los datos por las curvas isoyetas de precipitación 50% de Elías Almeyda y el de la Organización Meteorológica Mundial. El primero de ellos da valores bastante más altos que los controlados en la estación San Pedro llegando a cifras de 100 milímetros anuales para el centro del Salar. Sin embargo, las curvas del plano de OMM dado en la figura 5 se ajusta en mejor forma a la estadística controlada en San Pedro que registra un promedio de 15,1 milímetros anuales. Las precipitaciones medias asignadas al área en estudio según la OMM corresponden a lluvias de 10 mm. anuales en el área del Salar, 100 mm para las cumbres más altas del borde oriental y más de 400 mm. en las cabeceras de los ríos San Pedro y Vilama que por su altura (más de 4.000 mts.) cae en forma de nieve. Otro criterio en la estimación de la precipitación en la hoya del Salar, sería el que la relaciona con la altura. Se cuenta sobre el particular con dos relaciones; una contenida en el informe de Guennady Golubev sobre "Condiciones Hidrológicas en el Norte Grande" en el que se establece una relación lineal de precipitaciones con la altura. La segunda relación válida para el área de la Pampa del Tamarugal define una función exponencial entre ambas variables. Las dos curvas se apoyan en la precipitación de Ollague. Si se asume que la relación obtenida para la Pampa es válida para el Salar, permitiría disponer de un segundo criterio para evaluar la precipitación media incidente en la cuenca. Esta hipótesis no estaría lejos de la realidad si se compara la lluvia controlada en San Pedro 15.1 con la que se obtiene del gráfico 6 para su altura de 2436 m. Otro elemento de control de la bondad de la curva es la estación el Tatio, ubicada 4320 m. de altura junto al límite extremo Norte del Salar que aunque dispone de un sólo año (1970), la precipitación (143 mm.) coincide con la curva para su altura. Por otra parte este último criterio resulta siempre más exacto en el cálculo de precipitación cuando los fenómenos pluviométricos se relacionan con la altura, situación que corresponde a la de los bordes norte y oriental del Salar. En efecto, al disponer de curvas hipsométricas, (Fig. 8) es posible asignar a las curvas de





nivel de la cuenca la precipitación que le corresponde en función de la altura. Esta metodología se empleará más adelante como una alternativa frente a la dada por las curvas isoyetas para la evaluación de los coeficientes de escorrentía, de modo que de la comparación de resultados se obtengan conclusiones respecto a la confiabilidad de uno u otro criterio sobre la pluviometría en la hoya.

C A P I T U L O N O 3

H I D R O L O G I A

3.1. Caudales Superficiales.-

El principal aporte superficial que ingresa al Salar lo constituye el río San Pedro que ingresa por el borde Norte. Lo forman los ríos Putana, Jauna, Machuca y Salado siendo este último su principal tributario con un caudal medio de 150 a 200 lts./seg. caudal que se reduce en la confluencia a valores 80 a 100 lts/seg. por efecto de infiltraciones. El río Machuca por su parte aporta un caudal prácticamente constante de 40 lt/s. (Dávila 1960).

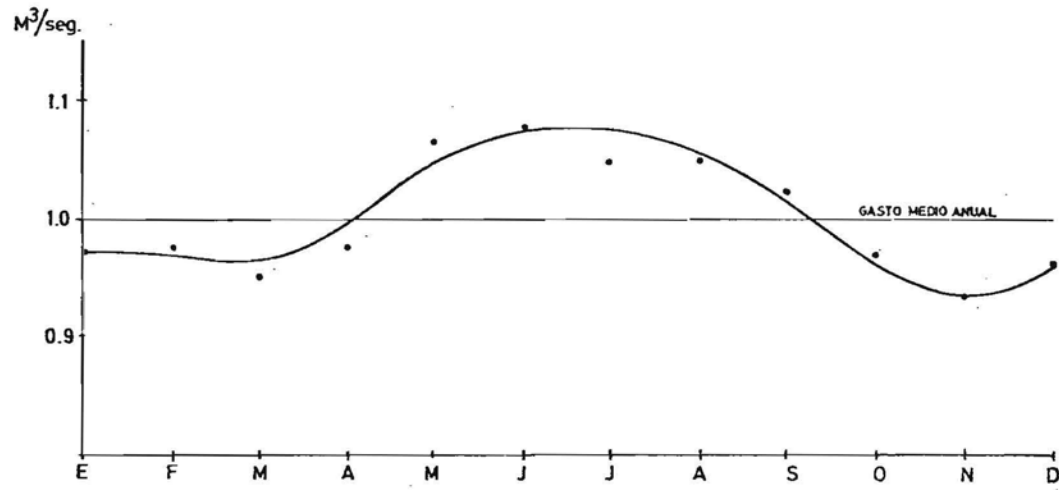
El gasto del río San Pedro presenta una gran constancia en su estadística controlada desde 1947 en la estación Cuchabrache (anexo 2). La figura 7 ilustra el caudal medio mensual. En él manifiesta un valor sostenido sobre el promedio en el período invernal de Abril a Septiembre. Esta situación puede explicarse no por efecto de lluvias que en general no ocurren en esta época en la alta cordillera ni por derretimiento de nieves por corresponder a este período las temperaturas más bajas del año como se aprecia en el gráfico 1 de temperaturas ni tampoco por cambios en las fuentes de alimentación que por la constancia del gasto provienen seguramente de aguas subterráneas; la razón puede encontrarse en la menor evaporación mostrada en el gráfico N° 2, para este período y también en el menor uso de agua en regadío de las siembras que por la presencia de heladas las destruiría.

El segundo aporte importante de aguas al Salar lo proporciona el río Vilama que corre por una hoya contigua a la del San Pedro.

El río Vilama de menor caudal que el anterior se aprovecha en

FIG. Nº 7

GASTOS MEDIOS MENSUALES
RIO SAN PEDRO EN CUCHABRACHE



parte en el abastecimiento de agua potable de San Pedro y en regadío de Soncor. El caudal medio aforado aguas arriba del pueblo de Vilama es de 218 lt/seg. Este río tiene sus nacientes en aguas de origen termal, lo forman el río Puritama, el río Frío y el río Puripica este último se une al Vilama en la localidad de Guatin.

Por el borde oriental ingresan al Salar aportes superficiales menores provenientes de las quebradas que lo surcan. De ella la más importante por la cuantía del gasto aportado al Salar es Aguas Blancas cuyo caudal medio de 134 lts.seg. con pocas variaciones anuales (salvo crecidas eventuales debido a lluvias en la alta cordillera, su caudal se infiltra totalmente en el Salar. En el resto de las quebradas tales como Honar, Soncor, Camar, Socaire, Peine y Tilomonte en cambio, los recursos son aprovechados en gran parte en quebradas, siendo de este modo el aporte superficial directo al Salar reducido.

En la tabla Nº 8 se dan las características principales de los recursos controlados aguas arriba de la zona de cultivos. En el anexo 3 se indican los gastos controlados por CORFO durante el período Octubre - 1970 a Septiembre 1971.

T A B L A N º 8

Ríos y Qdas.	Gastos medios l/s	Conductiv. mmhos/cm	Control desde	Hás. cult.
San Pedro	999,8	2200	1947-70	1207
Vilama	218	2200	70 - 71	547
Honar	50	290	" "	40
Aguas Blancas	134	1700	" "	0
Soncor	28.5	480	" "	15
Camar	2.8	2200	" "	5,5
Socaire	168	1000	" "	300
Peine	16.8	3500	" "	7
Tilomonte	59	4900	" "	45
<u>Total</u>	<u>1.677</u>			<u>2220 Hás</u>

3.2. Análisis de Escorrentías.-

Los valores de los coeficientes de escorrentía se estimarán mediante una doble cuantificación de la precipitación recogida por la hoya del Salar de Atacama en los bordes Norte y Oriental.

Para una primera estimación del volumen anual medio precipitado se disponen de las curvas isoyetas del gráfico 5 preparado por la OMM.

Un segundo criterio de evaluación del volumen colectado por las principales quebradas se hará recurriendo a la relación de precipitación con la altura concebido para el área entre las latitudes $19^{\circ} 30'$ y $25^{\circ} 30'$ vale decir se asimilará para el borde norte y oriental del Salar la relación válida para la zona de la Pampa del Tamarugal. La precipitación así definida podrá ser aplicada de acuerdo a los gráficos 9 y 10 de distribución de superficies en función de la altura, gráficos que han sido deducidos de las curvas hipsométricas de la figura 8.

Finalmente ambos criterios de evaluación de la escorrentía se complementarán con la determinación empírica de este coeficiente mediante la relación de Becerril que considera la precipitación media en la cuenca para cuantificar las aportaciones superficiales de ésta.

Es importante dejar en claro que los valores de escorrentía calculados por los distintos procedimientos sólo servirán como referencia del orden de magnitud de este coeficiente para las distintas quebradas, por cuanto los caudales medios no son más que el promedio de unos pocos aforos aislados (salvo el río San Pedro) efectuados recientemente, que no corresponden al período hidrológico en que ocurrieron las precipitaciones utilizadas en los cálculos de este coeficiente.

3.2.1. Escorrentías en función de la precipitación determinada por curvas isoyetas.

Considerando la precipitación media en base a las isoyetas trazadas por la OMM, se realizó la estimación de la escorrentía en

forma separada para cada sub-cuenca del borde Oriental y Norte en puntos ubicados aguas arriba de su aprovechamiento en riego. En la columna A de la Tabla 9 se indican estos valores.

T A B L A N O 9

						A	B
SUB- HOYAS	Area Km2	PP MM	Vol.caído m ³ x10 ⁶	Gasto l/s	Vol.esc. m ³ x10 ⁶	Escorren. %	Esc.Calc. BECERRIL %
Río S.Pedro	1326	262	347.0	999	31.4	9.0	19.4
Río Vilama	361	175	63.0	218	6.9	10.9	15.8
Q. Honar	270	71	19.1	50	1.6	8.4	10.2
Q.A.Blancas	106	62	6.6	134	4.2	63.0	9.6
Q. Soncor	140	50	7.0	28.5	0.9	12.8	8.5
Q. Camar	38	50	1.9	2.8	0.09	4.8	8.5
Q. Socaire	146.	90	13.6	168	5.3	38.9	11.3
Q. Peine	62	45	2.8	16.8	0.53	18.8	8.0
Q. Tilomonte	462	69	32.0	59	1.9	6.0	10.0

3.2.2 Escorrentía en función de la expresión de Becerril.-

El otro criterio empleado en la determinación de la escorrentía se basó en la expresión empírica de Becerril la que considera que las aportaciones de una hoya son función de la precipitación media y de un coeficiente α que depende de la aridez de la zona en estudio.

$$a = \alpha \bar{p}^{3/2} \text{ (mm)}$$

a = altura de agua equivalente a la precipitación media en la hoya que escurre

α = coeficiente que para zona semiárida varía entre 0.012 y 0.014 (se consideró el valor 0.012 para los cálculos)

\bar{p} = precipitación media en milímetros.

$$\therefore \text{escorrentía} = \alpha (\bar{p})^{1/2}$$

En base a esta expresión y considerando la precipitación media dada por las isoyetas se obtuvieron las escorrentías que se indican en la columna B de la tabla 9.

Del análisis comparativo de las cifras de las columnas A y B se concluye que existe sólo una buena similitud de valores para el río Vilama y las quebradas Honar, y Soncor, y discrepancias para el resto de las quebradas. Estas discrepancias significativas no tanto para el río San Pedro como para las quebradas del borde Oriental esttarían indicando cuatro posibilidades

- a) Que la expresión de Becerril o el coeficiente 0.012 no sean buenos indicadores de las aportaciones de cada hoya.
- b) Que las precipitaciones asignadas en base a las curvas isoyetas están lejos de la realidad hidrológica, en especial Aguas Blancas y Socaire las que seguramente registran una mayor precipitación y por el contrario la hoya del San Pedro y Camar tendría una precipitación menor.
- c) Que los gastos considerados como medios aún no correspondiendo al período hidrológico para el cual se calcularon las isoyetas, tam poco expresan el valor real de su cuantía.
- d) Que siendo las escorrentías de la columna A reales, las discrepancias con las de Becerril se deben a la existencia de aportes subterráneos ajenos a la hoya hidrológica de cada quebrada. Las primeras conclusiones se revisarán a continuación con los valores de escorrentía determinados en base a la pluviometría definida en función de la altura.

3.2.3. Estimación de la precipitación en función de la altura para el cálculo de la escorrentía.

Mediante la relación precipitación-altura se evaluará la precipitación media y el volumen anual colectado para las principales quebradas. Un ejemplo de este cálculo se indica en el cuadro 10 siguiente.

C U A D R O N O 10

DETERMINACION DE LA PRECIPITACION MEDIA DE LA HOYA DEL
SAN PEDRO EN FUNCION DE LAS CURVAS HIPSOMETRICAS

Altura mts.	Area comprendida Km2	Precipitación mm.	Volúmen colecta- tado $m^3 \times 10^6$
5.100	40	375	15.0
5.100- 4.800	65	265	17.2
4.800- 4.500	184	190	35
4.500- 4.200	277	135	37.4
4.200- 3.900	197	95	18.7
3.900- 3.600	138	70	9.7
3.600- 3.300	156	50	7.8
3.300- 3.000	150	35	5.2
3.000- 2.700	56	26	1.5
2.700- 2.400	63	18	1.1
T O T A L	1.326		148.6

$$PP_M = \frac{148.6}{1326} = 0.112 \text{ mts.}$$

Procediendo análogamente a lo indicado para las principales quebradas del borde Oriental y considerando el área y el volúmen medio escuadrado dado por la tabla 9 se obtuvieron los coeficientes de escorrentía que se indican en la columna A de la tabla 11.

Usando la expresión de Becerril para la precipitación así calculada se obtuvieron las escorrentías esperadas correspondientes al volúmen caído en cada hoyo. En la columna B de la tabla 11 se indica estas escorrentías.

FIG. N°8

CURVAS HIPSOMETRICAS

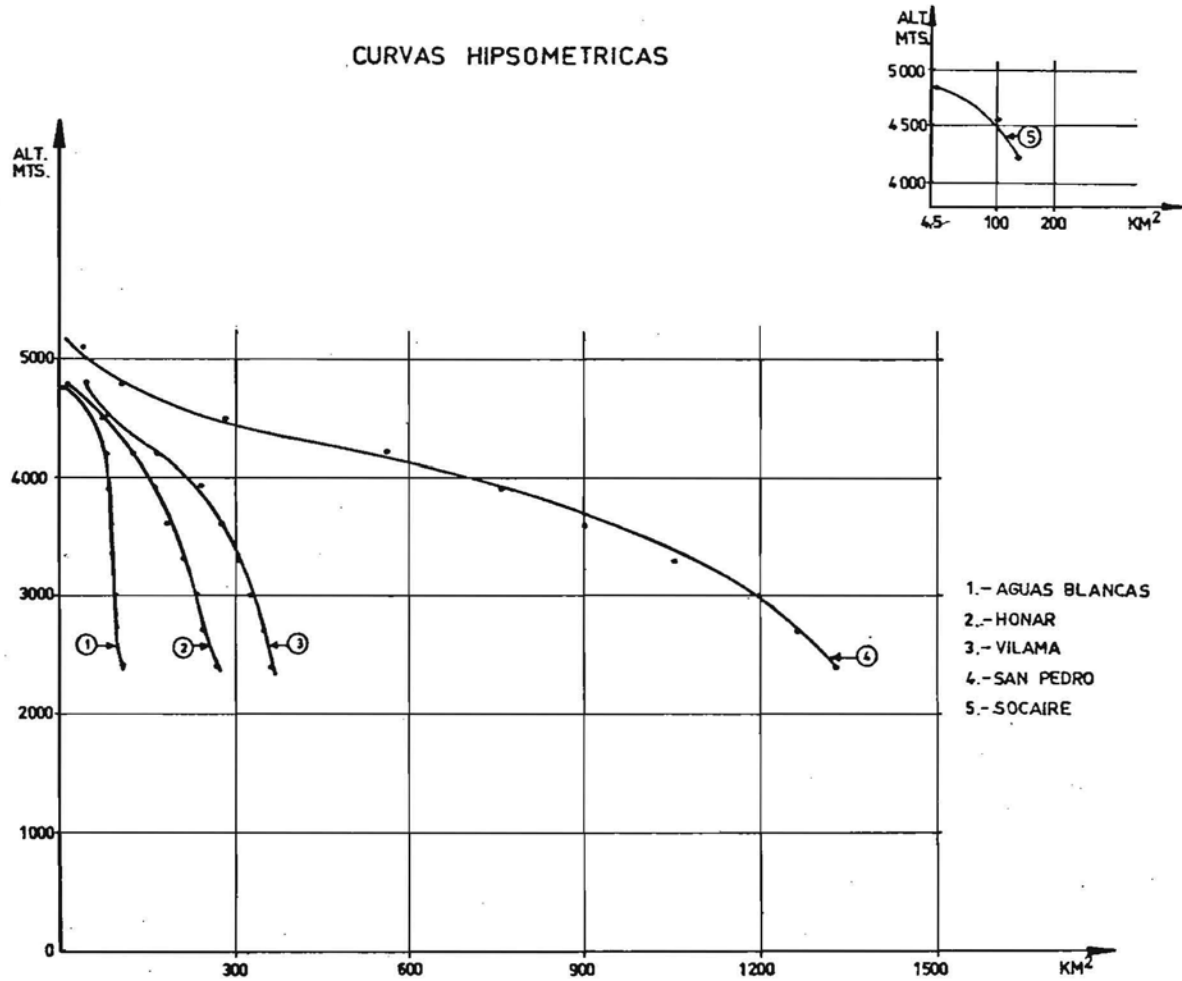


FIG. Nº 9

DIAGRAMAS DE DISTRIBUCION DE AREA CON ALTURA
HOYAS SAN PEDRO -VILAMA
SALAR DE ATACAMA

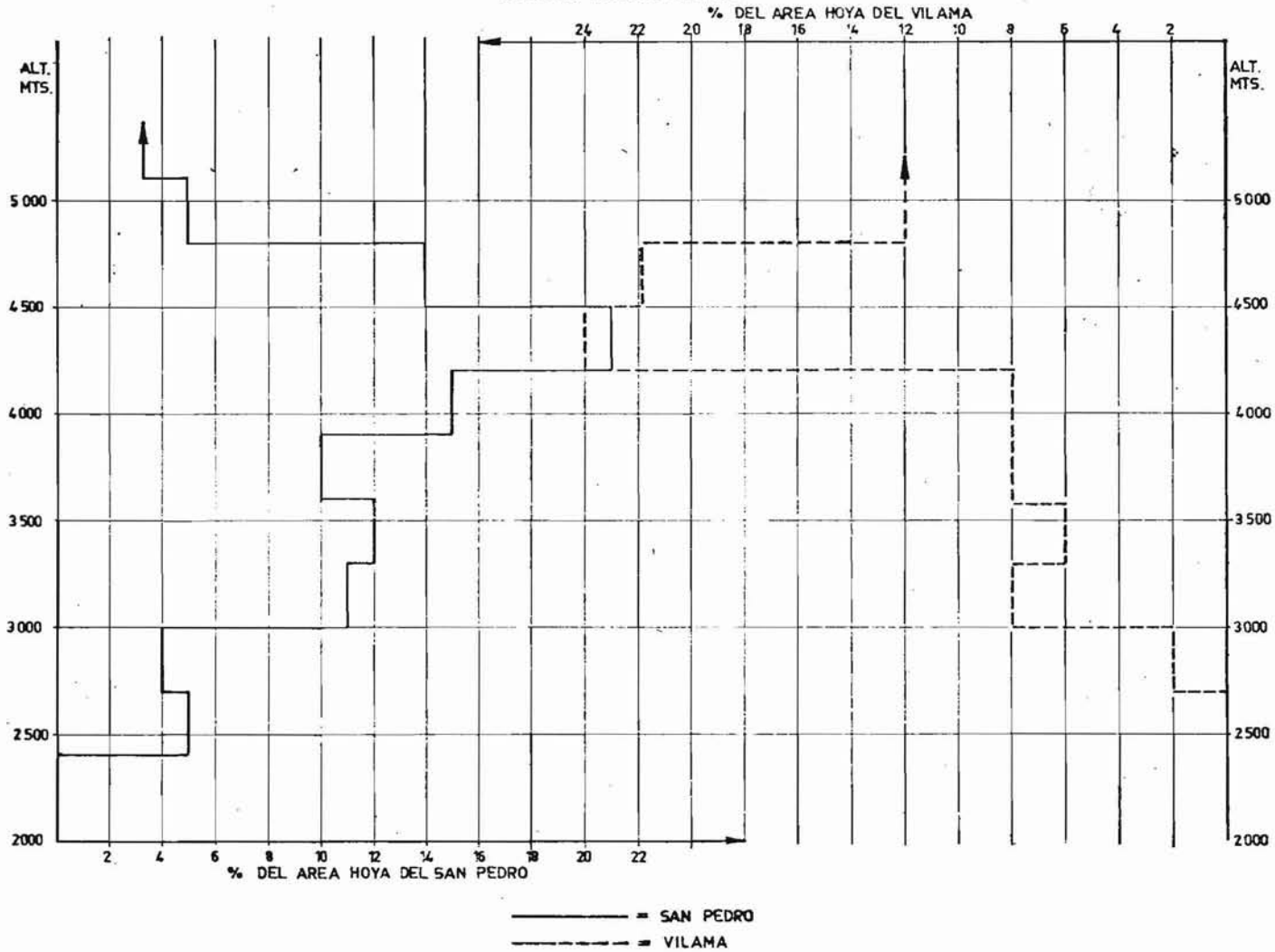
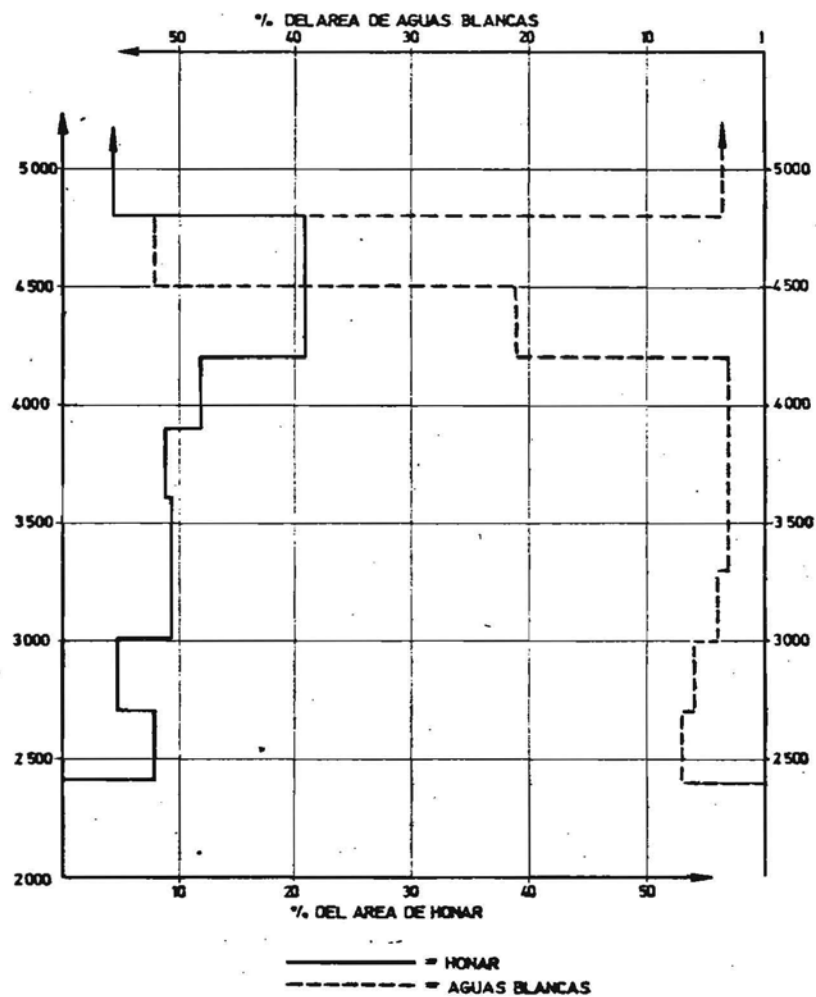


FIG. Nº 10

DIAGRAMA DE DISTRIBUCION DE AREA CON ALTURA
HOYAS HONAR-AGUAS BLANCAS
SALAR DE ATACAMA



T A B L A N O 11.

H O Y A S	Precip. mm.	Vol. Caído m ³ /10 ⁶	Vol. escurri do m ³ /10 ⁶	A	B
				Escorr. %	Escorre. Becerril
San Pedro	112	148.6	31.5	21.2	12.7
Vilama	126	45.7	6.9	15.1	13.5
Honar	110	29.8	1.6	5.3	12.6
Aguas Blancas	145	15.4	4.2	17.0	14.5
Soncor	78	10.9	0.9	8.3	10.6
Camarc	109	4.3	0.09	2.1	12.5
Socaire	208	303.	5.3	17.5	17.3
Peine	31	1.9	0.53	27.9	6.7
Tilomonte	76	35.1	1.9	5.4	10.6
PROMEDIO Y TOTALES	110	322.0	54.5	13.3	12.6

Comparando las escorrentías B de las tablas 9 y 11 puede observarse una menor dispersión de los valores de Becerril respecto al valor medio en el cuadro 11 donde la precipitación se obtuvo en función de la altura. Algo análogo ocurre de la comparación de las columnas A de ambas tablas. Por otra parte en el cuadro 11 se observan escorrentías bastante más moderadas para Aguas Blancas y Socaire las que prácticamente coincide con el valor esperado de Becerril.

De la comparación de ambos cuadros puede concluirse que las escorrentías de la tabla 11 ofrecen más confianza en sus valores: más aún si se piensa que tres estaciones pluviométricas relativamente cercanas al área en estudio, coinciden con la curva de precipitación ver sus altura. Analizando estas escorrentías se observa que salvo Honar, Soncor, Camarc y Tilomonte, los valores de la columna A son superiores a sus análogos determinados por la expresión de Becerril. La razón

de esto podría encontrarse en la existencia de vertientes que han recibido sus aportes de precipitaciones con intensidades distintas al año 50% considerado. Vale decir los escurrimientos corresponden a un período hidrológico distinto a las lluvias medias asignadas.

Esta afirmación para las quebradas de aguas Blancas y Peine y la hoya del San Pedro, explicaría la alta escorrentía.

Existe por otra parte, una teoría que explicaría también las altas escorrentías de algunos afluentes, como recursos provenientes de otras áreas ajenas a su cuenca.

En efecto Williams Rudolf ex-ingeniero de la Chile Exploration Company sostiene que el origen de las aguas superficiales de la hoya, provendrían de un cordón más occidental de la cordillera andina donde las precipitaciones son importantes. Estas se infiltrarían y buscarían su antiguo drenaje hacia occidente, anterior al surgimiento de la cadena volcánica que traza hoy la frontera chilena-boliviana. Las aguas surgirían como vertientes al otro lado de este cordón poroso haciéndose superficiales. Por otra parte en el mismo informe de W. Rudolf se establece que la mayor parte de la precipitación que cae en forma de nieve a alturas de 5.000 metros se evapora directamente, no constituyendo por lo tanto una fuente de recursos que justifiquen cierta constancia en los gastos hecho que es manifiesto en las quebradas que drenan al Salar.

Considerando la pequeña dispersión de las escorrentías calculadas por el método de Becerril podría tomarse como valor esperado de escorrentía para cada una de las quebradas analizadas, el valor medio de estos coeficientes de la columna B de la tabla 11, así las discrepancias respecto de este valor (12.6) indicarían los cursos que estarían siendo afectados por aportes subterráneos ajenos a sus hoyas. Así pues, puede concluirse que el río San Pedro, Aguas Blancas y Peine tendrían aportes subterráneos de otras áreas. En cambio de Vilama y Socaire, no se puede hacer tal afirmación pero tampoco puede ser descartada, por cuanto sus valores de escorrentía podría deberse a pérdidas importantes por infiltración aguas arriba de su punto de control.

Ahora bien, para los efectos estimativos del volúmen total de precipitación anual, podría considerarse que ésta cae principalmente en los borde Norte Oriental, con una intensidad igual al valor medio de la precipitación en las hoyas consideradas (110.5 mm.) esto significa un volumen anual de 322×10^6 m³ sobre una superficie de 2911 Km² que corresponde solo a la suma de las áreas de las hoyas analizadas. Admitiendo una escorrentía de 12,6% según el promedio de las escorrentías dadas por Becerril, el volúmen afluente superficialmente al Salar sería igual a 40.5×10^6 m³/año equivalente a 1285 l/seg, sin embargo se tiene controlado un gasto superficial total de 1677 l/s equivalentes a $53,2 \times 10^6$ m³/año. Esta discrepancia de escorrentía podría explicarse se podría explicarse por la existencia de aportes subterráneos ajenos a las hoyas que aflorarían haciéndose superficiales o bien por un error en la apreciación del coeficiente de escorrentía. El volúmen aportado subterráneamente a las corrientes de las quebradas de acuerdo a la primera hipótesis sería de 12.7×10^6 m³/año equivalente a 400 lts/seg. Una tercera posición más conservadora que las anteriores es el hecho que las precipitaciones consideradas en el cálculo de la escorrentía no corresponde al período hidrológico de los escurrimientos.

Sin embargo de las cifras dadas, queda claro el total desconocimiento si el coeficiente de escorrentía de 12,6 determinado por Becerril, es un buen reflejo de la escorrentía efectiva. Pudiendo variar fundamentalmente en base a este dato la idea que 400 lts/seg son producto de aportes subterráneos ajenos a las hoyas. Por otra parte de ser cierta todas las cifras antes anotadas, queda siempre la incógnita del caudal subterráneo que ingresaría por concepto de precipitación propia de la hoya como también por aporte de hoyas ajenas al sistema.

3.3. Análisis de Evaporaciones.-

3.3.1. Experiencias de evaporación realizadas en suelos salinos.-

Una de las variables más difícil de cuantificar por la falta absoluta de antecedentes en el Salar, corresponde a la evaporación desde las distintas costras que constituyen la superficie evaporante del sistema. Los únicos antecedentes disponibles corresponde a expe-

riencias realizadas en la Pampa del Tamarugal por J.M. Toro desde suelos arenosos-arcillosos cubiertos por costra salina.

Como un modo de establecer correspondencia entre las condiciones atmosféricas imperantes en el sector de esas experiencias y las existentes en el Salar en estudio, se pueden comparar los valores de evaporación potencial de ambas áreas.

$$\frac{\text{Evap. Potencial Salar Atacama}}{\text{Evap. Potencial Pampa Tamarugal}} = \frac{2130}{1690} = 1.26$$

Vale decir las condiciones del poder evaporante de la atmósfera en el Salar superan en un 26% las existentes en la Pampa del Tamarugal. Afirmación que queda apoyada por la comparación de la velocidad de vientos en ambas zonas.

Salar Atacama 35 Km/hora a 40 cm. del suelo

Pampa Tamarugal 15 Km/hora

Aún cuando la temperatura en la Pampa es superior en 2,7 ° C. a la controlada en San Pedro de Atacama.

De acuerdo a esta comparación podría asumirse para los efectos de estimación de la evaporación desde el Salar los valores obtenidos en la Pampa afectados por un coeficiente correctivo dado por la razón entre evaporaciones potenciales (1,26)

Se presenta a continuación los resultados de las experiencias realizadas por J.M. Toro en la Pampa (nivel estático a 0.90 mts) y las extrapolaciones asumidas para el Salar para un nivel freático de 1 a 2 metros de la superficie.

* Evaluación realizada por CORFO.

Tipo de Suelo		Vegetación	Evaporaciones mm/año	
			Pampa	Salar
Arenoso grueso	sin costra	sin bosque	318	400
Arenoso fino	sin costra	bosque de 8 años	162	182
Arcilloso	con costra	bosque 30 años	62	78
Arcilloso	con costra gruesa	bosque 30 años	3.2	4.4

3.3.2. Estimación de la evaporación en el Salar.-

Se supondrá para los efectos de cálculo que la máxima evaporación posible corresponde a la potencial desde superficie libre.

El efecto reductor de evaporación de la sombra de los bosques de la Pampa se asumirá reemplazado por la mayor profundidad de los niveles estáticos del Salar.

La evaporación desde zonas de vegas se supondrá igual en la medida desde suelo arenoso grueso sin costra y nivel estático a 0.90 mts.

1.- Costra de Limos salinos

Superficie: 198,8 Km² Nivel Estático Profundo
 Evaporación estimada anualmente: 4,4 mm.
 Volúmen evaporado: 0,8 Hm³

2.- Costra Cloruro Yesifera se subdivide en:

a) Cloruro y Limos

Superficie: 61,7 Km²
 Evaporación estimada: 78 mm
 Volúmen evaporado: 4,8 Hm³

b) Cloruro en Globulos con N.E. superficial cubierto por costra

Superficie: 180,1 Km²
 Evaporación estimada: 400 mm.

Vol Evaporado:	72,0 HM ³
c) Cloruro con yeso de espesor = 25 cm.	
Superficie:	109 Km ²
Evaporación estimada:	4,4 mm
Volúmen evaporado:	0.5 HM ³
3.- Costra yesifera	
Superficie:	462 Km ²
Evaporación:	4,4 mm.
Volumen evap.:	2,0 HM ³
4.- Costra delgada de cloruros	
Superficie:	77,9 Km ²
Evaporación:	182 mm.
Volumen evap.:	14.2 HM ³
5.- Costra con núcleos de cloruros (Espesor medio: 70 cm)	
Superficie:	1810 Km ²
Evaporación estimada	= 4,4 mm.
Volúmen evap. :	7,9 HM ³
6.- Lagunas	
Superficie:	13,4 Km ²
Evaporación estimada:	2130 mm. (evap. pot.)
Volúmen evap.:	28,5 HM ³
7.- Zona de Vegas:	
Superficie:	180 Km ²
Evaporación estimada:	=400 mm.
Volúmen evap.:	72.0 HM ³

De acuerdo a las cifras indicadas, la evaporación media anual resultaría 202,7 HM³ equivalente a 6,43 m³/seg. en un área de 3099 Km²/ aproximadamente.

Con el análisis realizado hasta este punto de las distintas variables hidrológicas restaría sólo determinar las entra

das subterráneas al sistema definido por el agua embalsada bajo la costra salina. Sobre este punto se aclararán algunas ideas en el capítulo siguiente.

HIDROGEOLOGIA CUALITATIVA4.1 Antecedentes.-

La investigación de los recursos hidráulicos del Salar de Atacama ha requerido la construcción de 167 sondajes, 37 de los cuales alcanzan medianas y grandes profundidades y los 130 restantes, corresponden a sondajes de pequeña penetración (menores de 30 mts.) Su distribución abarca los SECTORES NORTE, BORDE ORIENTAL Y SUR con una leve concentración en las inmediaciones de San Pedro. Fundamentalmente la totalidad de los sondajes ha tendido a un triple propósito: reconocimiento estratigráfico, observación de niveles y muestreo químico. Se ha mantenido y mantiene un periódico control a la situación de niveles estáticos a lo largo de todo el Salar. Los registros de mayor amplitud alcanzan un período de 3 años mientras que los menores comprenden un lapso de 1.

La información acumulada permite definir en forma cualitativa la hidrogeología del acuífero libre postergándose por corto plazo una definición cuantitativa. Los antecedentes parciales y la complejidad mostrada por los acuíferos confinados, impiden por el momento un tratamiento similar al acuífero freático.

4.2. Acuíferos reconocidos.-

Geológicamente se han reconocido en el Salar de Atacama cinco macrounidades nominadas por su secuencia vertical. Dentro de ellas cabe distinguir dos sistemas acuíferos diferenciados entre sí por las distintas condiciones de presión a que se encuentran sometidos.

Reconocido en toda la extensión del Salar se distingue superficialmente un acuífero freático de profundidad variable con un espesor promedio no superior a 50 mts. Se encuentra conformado por sedimentos aluviales predominando arena, grava y ripio con

intercalaciones de limo-arcilla y ceniza.

Bajo él y separado por una unidad impermeable se detectan dos zonas acuíferas confinadas, distribuidas sectorialmente lo cual proporciona un índice de su desuniformidad.

A lo largo del Salar la desuniformidad aludida se refleja principalmente en la presencia o ausencia de las zonas acuíferas y los distintos espesores que ellos comprometen.

El sector Norte presenta una sola zona acuífera confinada de pequeño espesor y discontinua en su desarrollo.

Dentro del Borde Oriental, el subsector Toconao-Huaytiquina muestra la existencia de ambos acuíferos confinados, identificados como unidades 3 y 5 separadas por una capa de ignimbritas que conforman la unidad 4.

Desde Camar hasta Tilopozo se identifica solo una zona acuífera dispuesta bajo la zona de ignimbritas.

En general la variabilidad que presenta la distribución de las zonas confinadas ha hecho compleja su prospección y correlación, limitando su exacta definición y exigiendo una investigación más profunda que la actual.

4.3. Acuífero Freático.-

Las particulares condiciones que presenta la hidrogeología en el Salar de Atacama, exigen que su tratamiento se realice por zonas. Las zonas definidas corresponden con leves variaciones en sus límites, a las ya definidas a través del reconocimiento geológico.

Sector Norte: abarca la zona comprendida entre el río San Pedro, Tambillo y San Pedro de Atacama.

Borde Oriental: Se extiende desde Tambillo hasta Peine.

Sector Sur: Comprende los sectores Tilomonte y Tilopozo.

4.3.1. Profundidad Nivel Estático.-

a) Sector Norte.- El nivel estático se presenta a una profundidad variable, dependiendo de la distancia que separe al punto de la zona de descarga (Salar). Así en Solor el nivel estático se encuentra a una profundidad superior a 10 mts. decreciendo paulatinamente hacia el sur. Ya en Cúcuter el nivel estático alcanza profundidades de solo 4 a 6 mts. (Mapa isoprofundidad) e internándose levemente en el Salar se comprueba el afloramiento de la napa (Laguna Sejar). En el sentido Este-Oeste existe igualmente una variación en la profundidad del nivel, pero ella adquiere formas sustancialmente más moderadas.

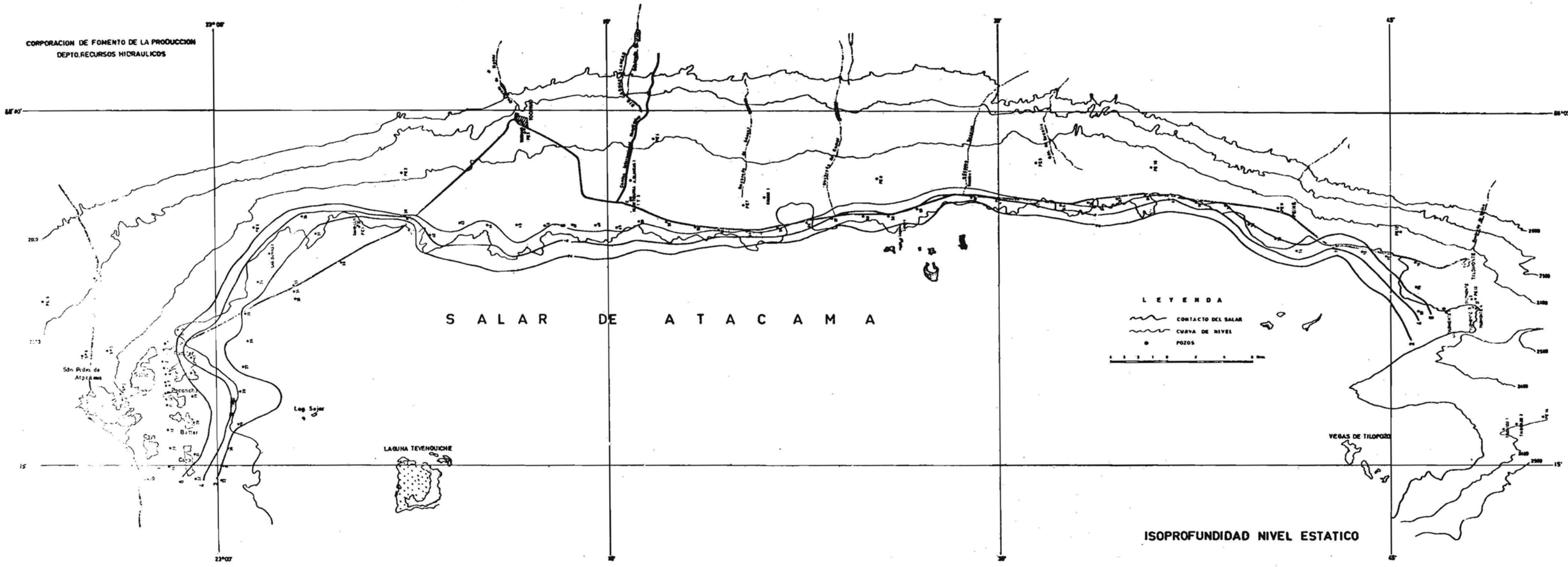
b) Borde Oriental.- El nivel estático promedio a lo largo de la línea de sondeos Norte-Sur alcanza profundidades variables entre 3 y 5 metros, creciendo rápidamente a medida que nos desplazamos en dirección Este. Rasgo característico de este sector es la permanencia bastante acentuada de las condiciones de uniformidad del N.E. en toda su extensión. A medida que se avanza hacia el Salar, en forma similar al sector Norte, se produce gradualmente el afloramiento de la napa.

c) Sector Sur.- Esta zona presenta diversas condiciones para los dos subsectores que ella abarca.

El subsector Tilomonte muestra una similitud con los sectores anteriores, variando la profundidad del nivel estático de acuerdo a la distancia que separe al punto considerado de la zona de descarga, representada por las vegas existentes. Así desde el sondeo P.E 13 hasta el sondeo 81, la profundidad varía desde 15 hasta 1 mt.

El subsector Tilopozo en cambio presenta condiciones totalmente diversas, a tal extremo que el acuífero freático se encuentra seco.

CORPORACION DE FOMENTO DE LA PRODUCCION
DEPTO. RECURSOS HIDRAULICOS



SALAR DE ATACAMA

LEYENDA

- CONTACTO DEL SALAR
- CURVA DE NIVEL
- POZOS



ISOPROFUNDIDAD NIVEL ESTATICO

a) Sector Norte.- La magnitud que presentan las fluctuaciones en este sector revisten cierta importancia dadas las condiciones hidrológicas de la zona. Las fluctuaciones en general, sólo muestran un carácter estacional con un máximo descenso en los meses de Mayo y Junio. Este descenso comienza en los meses de Septiembre y Octubre que, por consiguiente, corresponderá al período de mínima profundidad.

Del análisis de las fluctuaciones observadas en el perfil Este-Oeste, esquematizado en el gráfico N^o 11 puede deducirse que existe una relación entre su magnitud y la profundidad del nivel estático. Las fluctuaciones revisten mayor importancia cuanto menor es la profundidad, hecho que permite correlacionarlas con la descarga producto de evaporación y transpiración de freatófitas. Sondajes situados en las cercanías del río San Pedro, como el caso del pozo 32, con una profundidad similar a los sondajes 30 y 27, escapan a este fenómeno general, presentando fluctuaciones mucho menores. Semejante anomalía nace del papel de barrera de control del flujo que desempeña el río San Pedro. (Gráfico N^o 12).

La magnitud de las fluctuaciones que presenta el perfil antedicho está comprendida entre 10 y 30 cms. y no muestran una tendencia anual.

Diferente es la situación que presentan los sondajes ubicados más al Norte de este perfil, puesto que manifiestan una tendencia al descenso (además de la variación estacional). Es así como en el sondaje A - 1 este déficit de recuperación alcanza a 10 cm. en el año de observación. Dada la profundidad del nivel, las condiciones de evaporación se presentan mucho más adversas que hacia el Sur, ello sin embargo no constituye inconveniente para la transpiración del tipo de freatófitas existentes.

b) Borde Oriental.- Las fluctuaciones que presenta esta zona son de menor importancia que en el sector Norte, alcanzando como máximo valores de 15 cm. para profundidades de nivel comprendidas entre 2 y 10 mts. La cronología de los descensos coincide con la demostrada por el sector Norte, llegándose al máximo en los meses de Mayo y Junio.

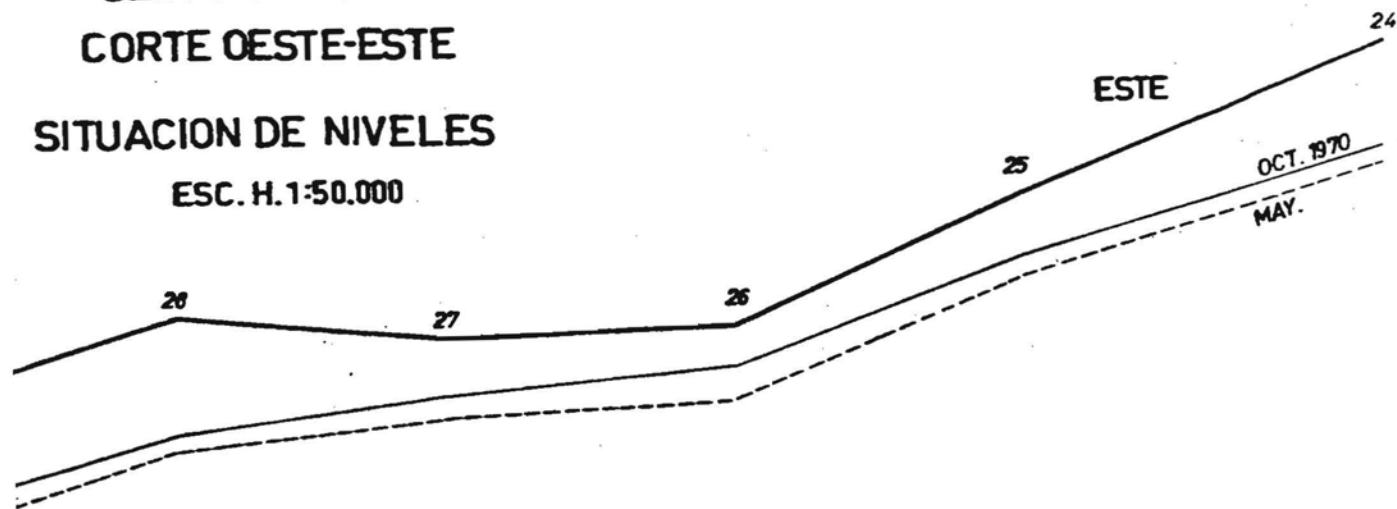
SALAR DE ATACAMA

SECTOR NORTE

CORTE OESTE-ESTE

SITUACION DE NIVELES

ESC. H. 1:50.000



NOTA.- La situación de OCT. 1970 corresponde a la misma escala de la sup. de terreno.
Para los descensos se ocupó una escala más ampliada $f_{cm} = 0.50$ mt.

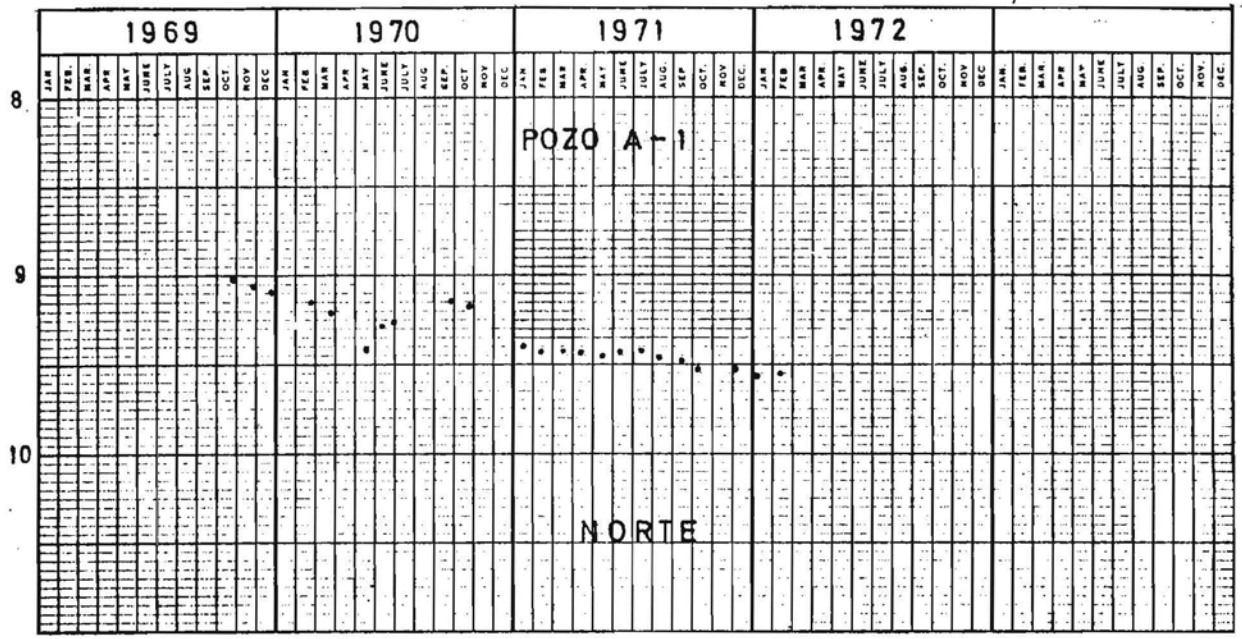
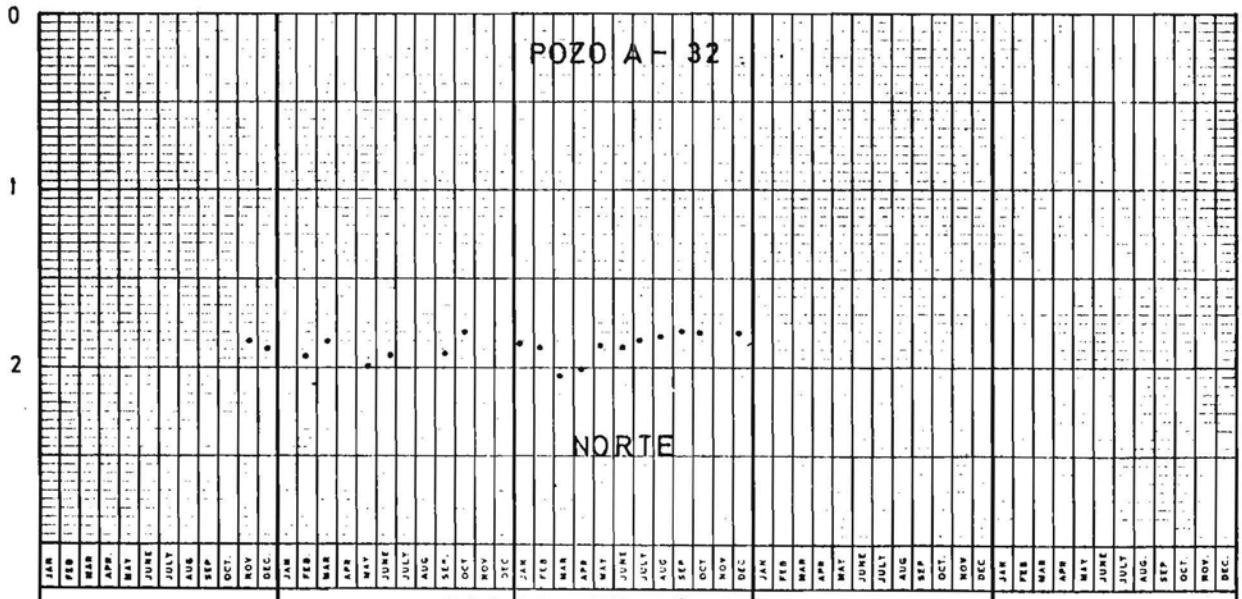
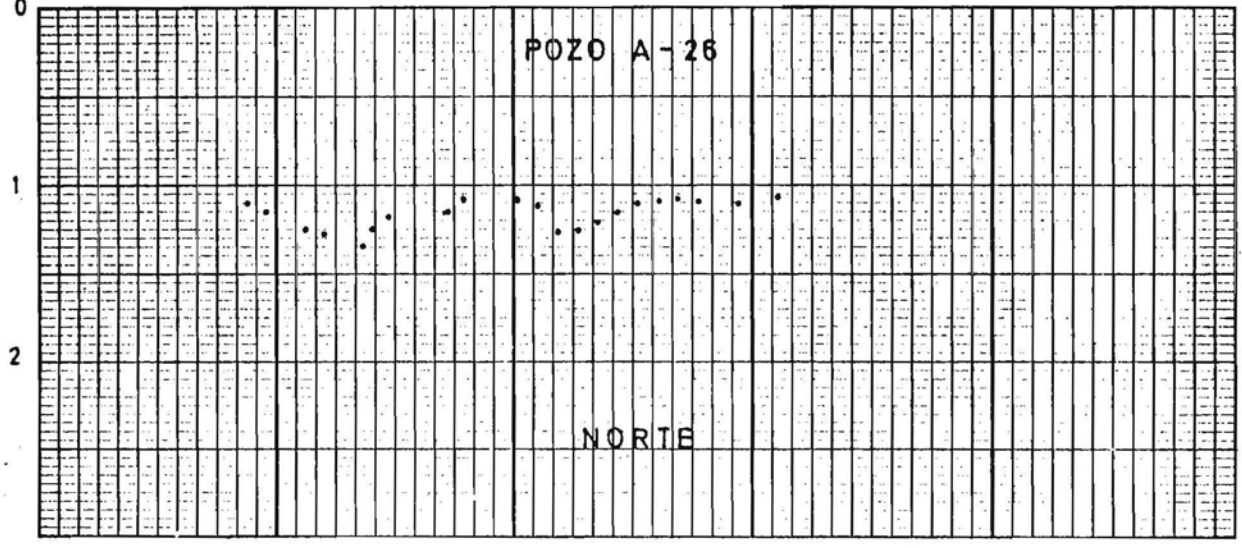


GRAFICO N° 12



Para profundidades de N.E. inferiores a 2 mts. (por ejemplo sondeo N° 38), esta variación alcanza valores superiores a los 35 cms. y no se presenta para profundidades superiores a 10 mts.

Pese a ser escasos los limnigramas que abarcan períodos más allá de dos años, existen antecedentes que permiten suponer una tendencia al descenso del nivel. Las fluctuaciones se encontrarían, por lo tanto, enrangadas dentro de una franja que acusaría una sensible tendencia al descenso en el tiempo (ejs. sondeos 43 - 45 - 82). (Gráfico N° 13).

c) Sector Sur.- En este sector las fluctuaciones que presenta el nivel estático del acuífero freático se reducen a las detectadas en el Subsector Tilomonte. (Gráfico N° 14).

El subsector muestra una situación similar, en cuanto a fluctuaciones de nivel, a la presentada para el Borde Oriental. Los descensos máximos se producen en las zonas de alto nivel estático (vecindades de la zona de descarga) registrándose un máximo de 35 cms. para el sondeo N° 81.

Un análisis de la situación a nivel de todo el Salar indica una cronología coincidente en cuanto a los descensos máximos y mínimos. Basados en dicha coincidencia y pese a que no es el objetivo de este trabajo la cuantificación de las variables, se ha intentado estimar por la importancia que reviste, en primera aproximación la magnitud del proceso de evaporación y transpiración ocurrente a lo largo del Salar.

De acuerdo a las fluctuaciones analizadas y si se acepta un promedio anual de ellas, a lo largo de la zona de descarga, de 20 cm. en conjunto con un coeficiente de almacenamiento de 10% se obtendrá un aumento de volúmen descargado de 55 millones de m³ anuales. Dicha cifra representa un límite inferior del volúmen total anual descargado por evaporación y transpiración.

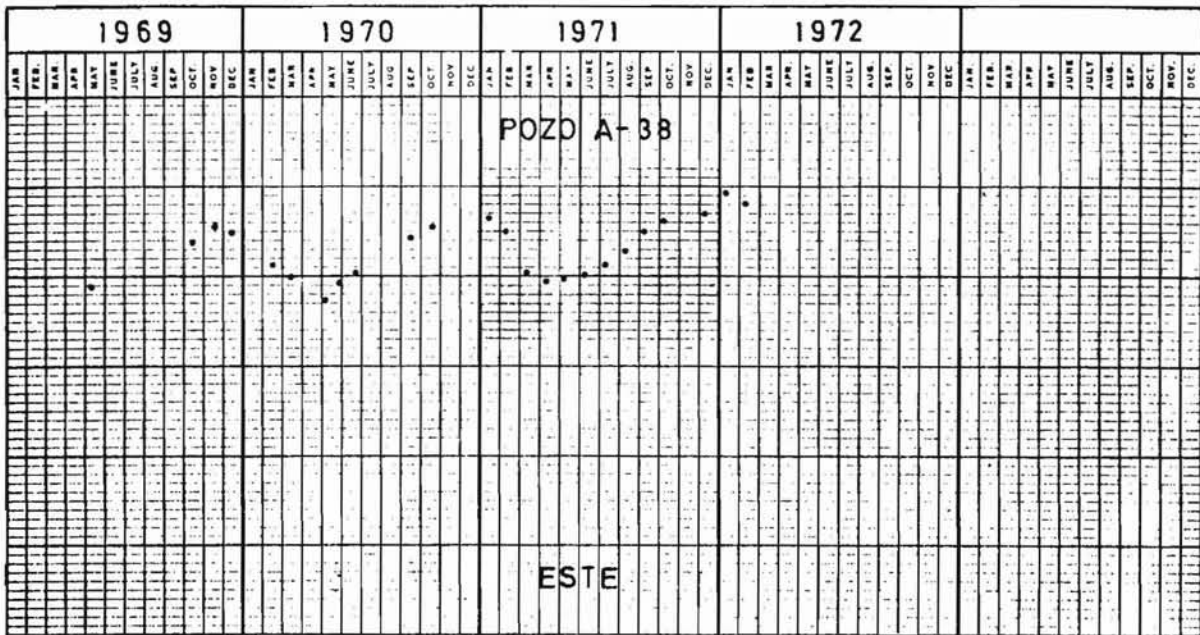
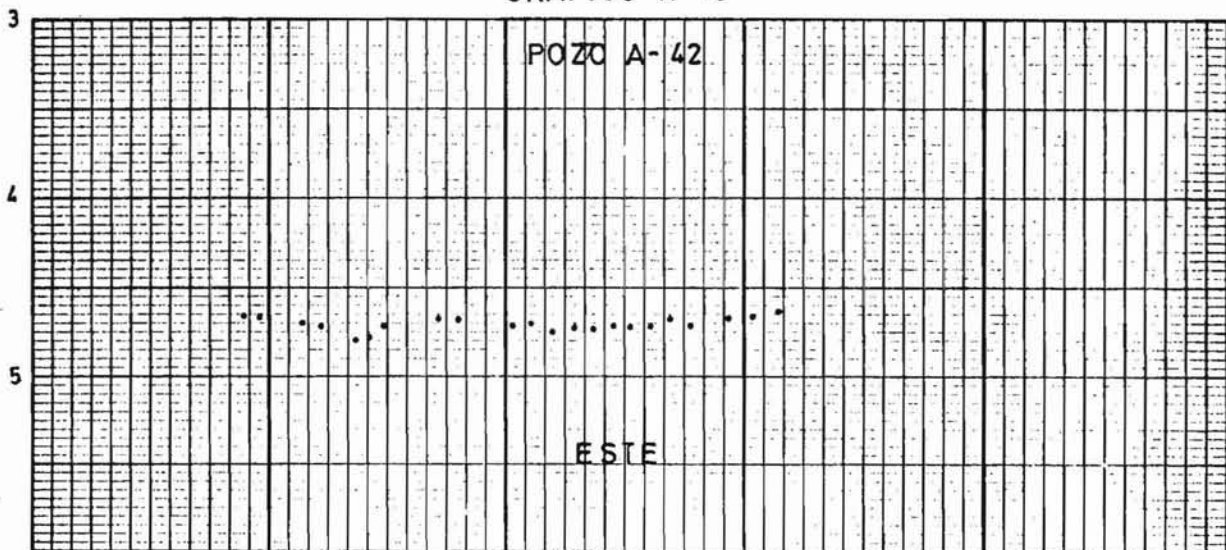
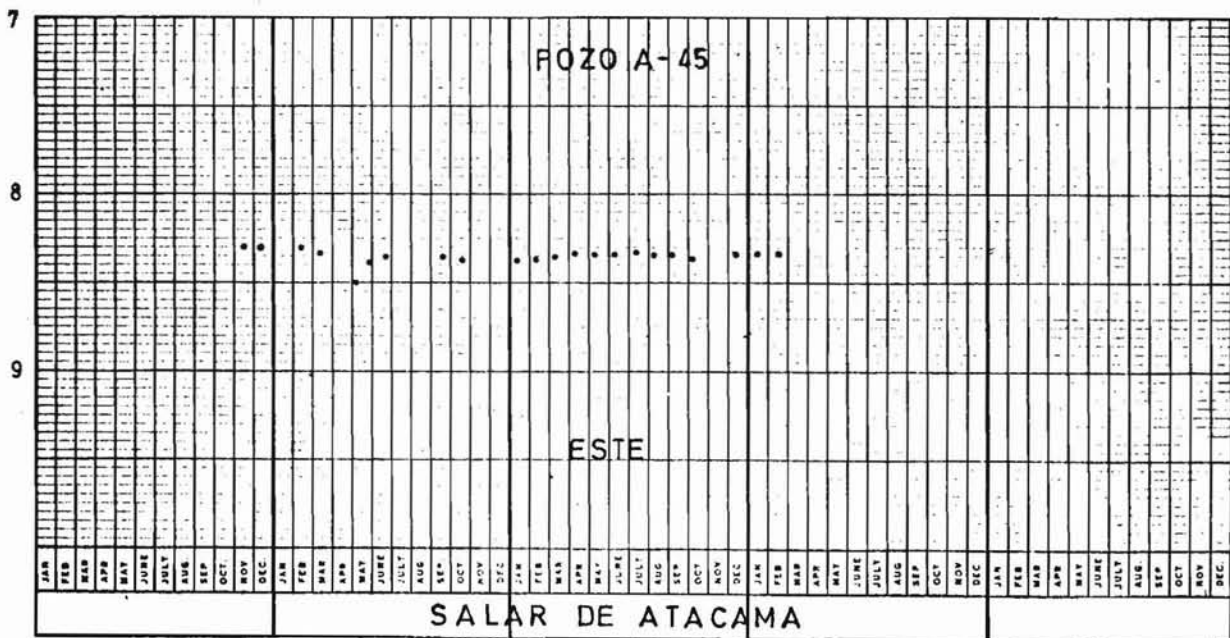


GRAFICO Nº 13



ESTE



ESTE

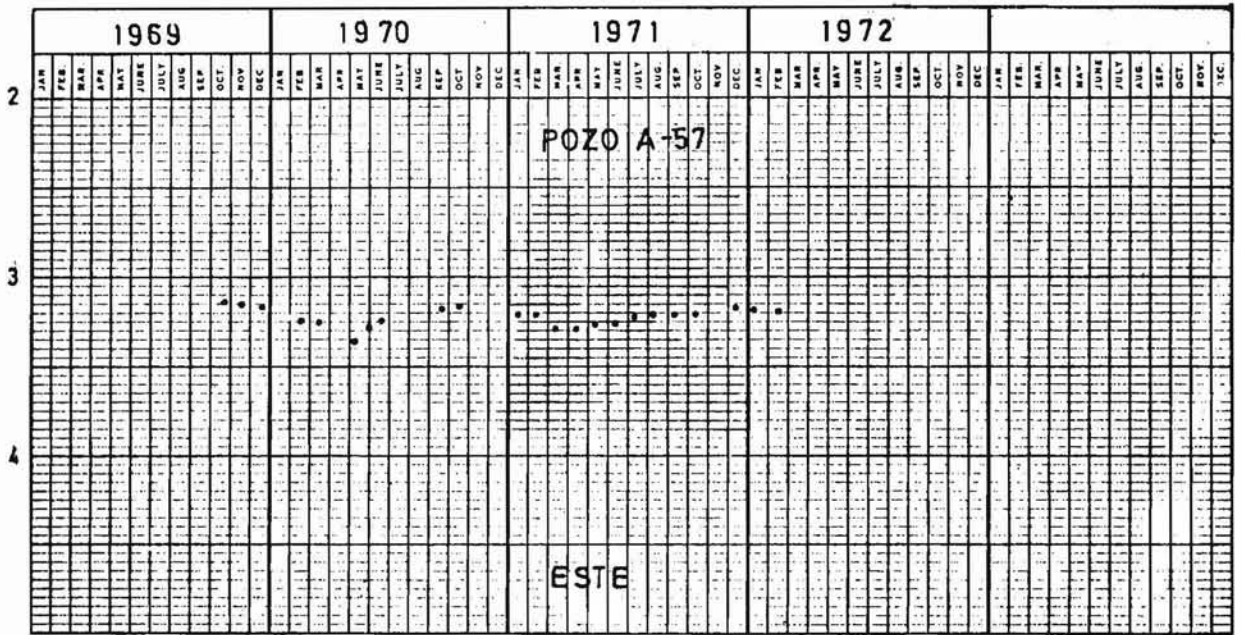
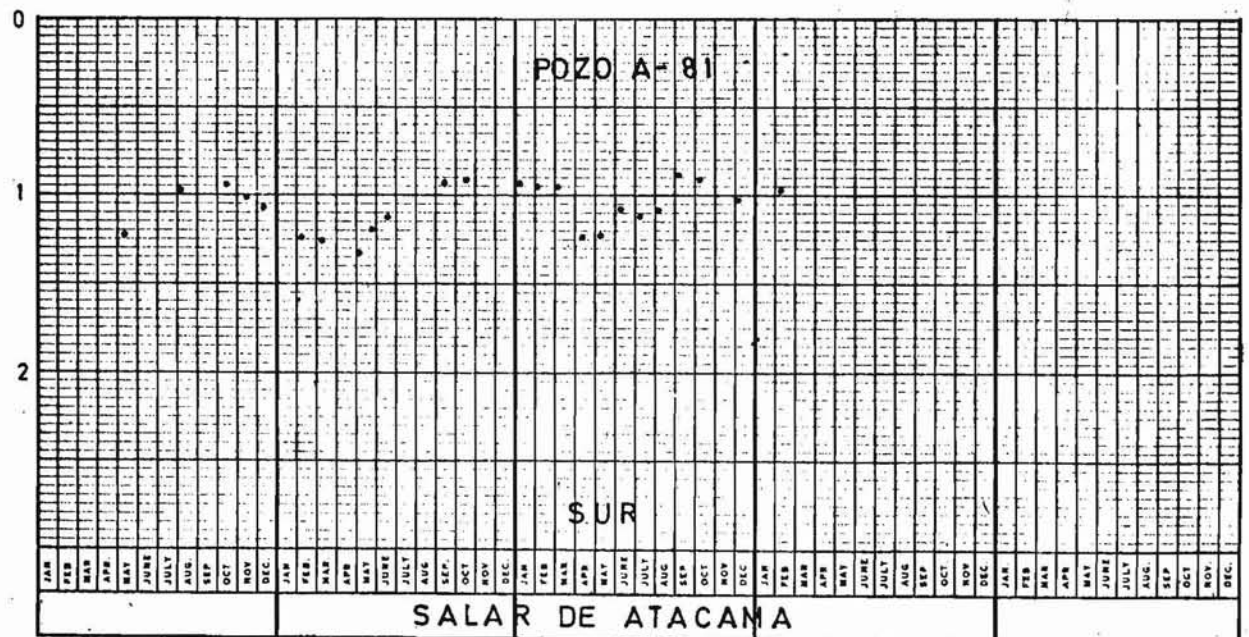
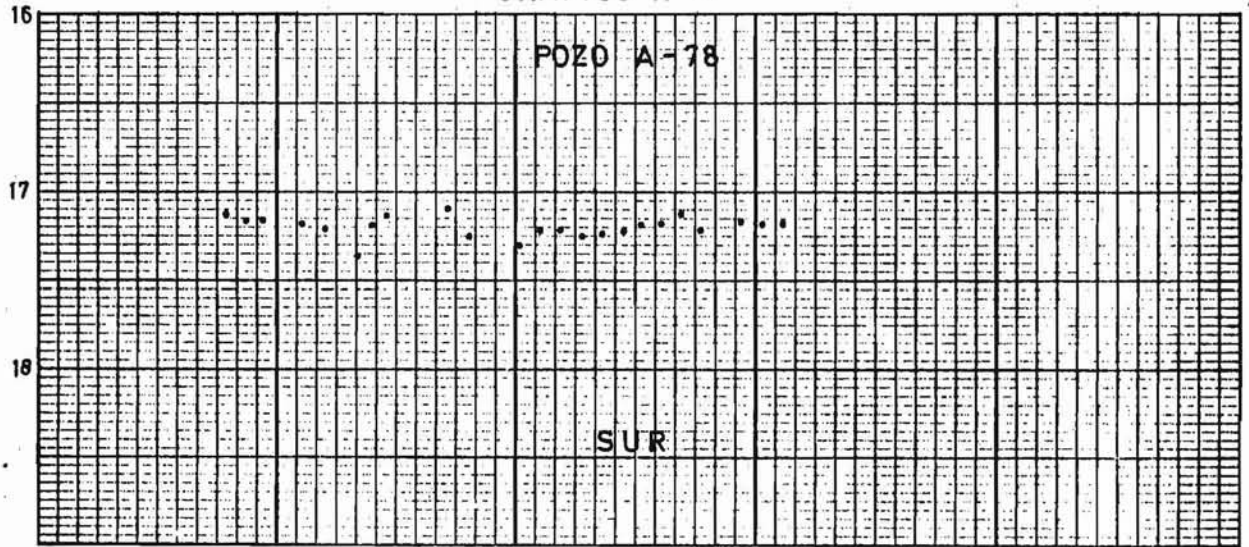


GRAFICO Nº 14



Intepretación de las Fluctuaciones:

Cabe plantearse, atendiendo a las fluctuaciones observadas, distintas hipótesis que explicarían un fenómeno que alcanza a la generalidad de los sondeos. La ubicación preferente de los sondeos con mayores fluctuaciones en las zonas consideradas de descarga, plantea la posibilidad de ser producto de efectos evaporativos y transpirativos. Sin embargo, si se analiza una curva de evaporación anual, se observa que la menor tasa se alcanza justamente en la época de mayores descensos. Si las fluctuaciones se atribuyeran a la pluviometría, dado que ellas alcanzan cantidades poco significativas y ocurren en zonas donde su posibilidad de infiltración es escasa, para el período de control de fluctuaciones, específicamente piedmonts y salidas de quebradas, cabría desecharlas como causantes del fenómeno.

Si consideramos las fluctuaciones observadas como producto de una recarga proveniente de precipitaciones ocurridas en zonas altas, cabría oponer a ello no sólo las distintas distancias que separan a los sondeos de las supuestas zonas de infiltración al observarse, sin embargo, una perfecta coincidencia en el tiempo en la totalidad de ellos en sus tendencias y descensos máximos sino que, además añadido a lo anterior, la constancia que durante el año presentan los caudales superficiales, todo lo cual hace poco probable semejante hipótesis.

Ante la posibilidad de una recarga proveniente, en forma conjunta, de precipitaciones y escurrimientos superficiales, cabría interponer igual objeción.

Finalmente, un proceso transpirativo cabría como posibilidad de explicación, especialmente si consideramos la existencia de vegetación en las zonas afectadas. Ello podría ser confirmado a través de un estudio del proceso vegetativo que presente la flora existente.

En todo caso, para las especies habituales, estos procesos comienzan su período de mayor actividad justamente en los meses de Septiembre y Octubre, que es en la época en que se observa la iniciación

del descenso del nivel estático.

A pesar del breve período de registro obtenido, podemos afirmar que el sector Norte no manifiesta la general tendencia al descenso que muestra el borde Oriental y que, a nuestro juicio, se debe a que este sector cuenta con una recarga importante de regadío. El caso del pozo A-1 en que evidencia esta tendencia, debemos interpretarlo por el hecho de que no se encuentra en el área de acción de la recarga por riego, sino al igual que borde oriental, de la recarga proveniente de quebradas.

Finalmente, es necesario agregar que esta tendencia al descenso inferida, estaría indicando un déficit de recarga.

4.3.3. Recarga, Movimiento, Descarga.-

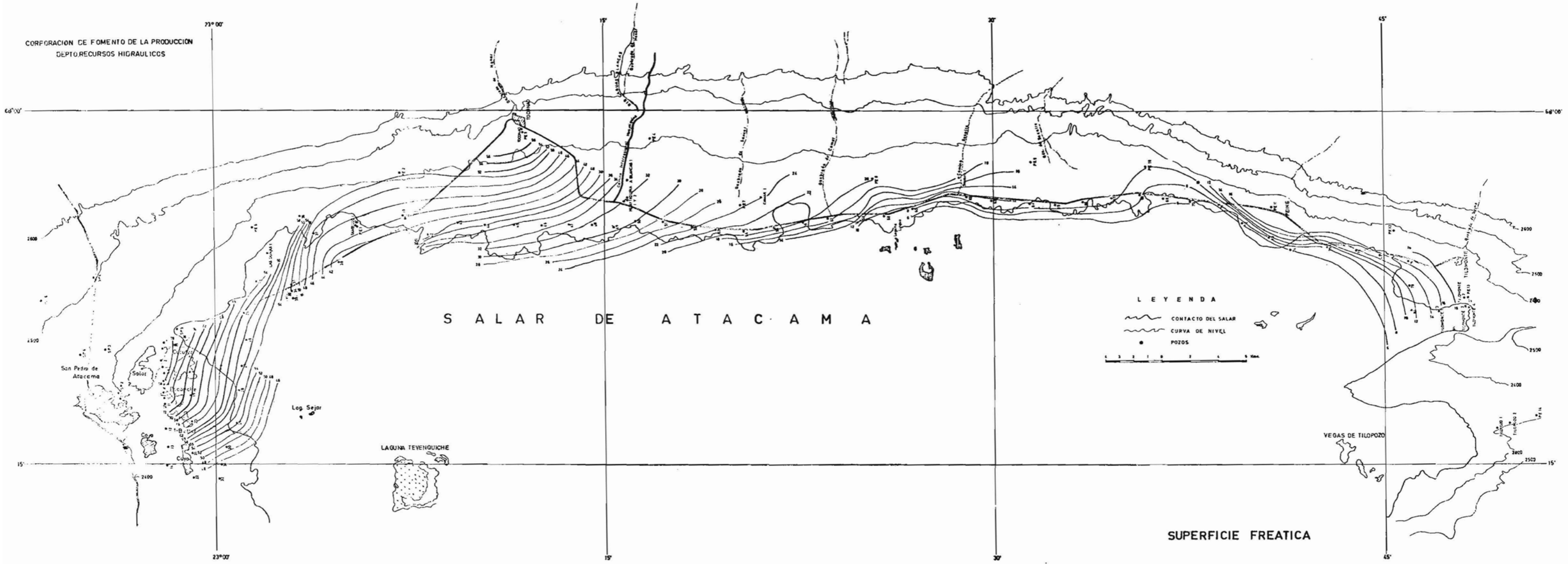
a) Sector Norte.-

Recarga: Hasta la zona comprometida por el trazado de la superficie freática (Mapa Superficie Freática) no se manifiesta un efecto de recarga proveniente directamente desde el río San Pedro y más bien la orientación del flujo indicaría una zona de recarga ubicada a? Nor-oriental del sector. Ello evidenciaría una contribución del sistema de quebradas en forma subterránea ya que ellas ingresan al Salar sin escurrimiento superficial.

Sin embargo, la magnitud reducida de las hoyas de estas quebradas y la evidencia de pérdidas en el caudal del río San Pedro, llevan a la conclusión que la forma de las equipotenciales ha de variar sustancialmente hacia el Norte.

Hacia el Oeste se evidencia una contribución adicional de las áreas de riego vecinas a San Pedro de Atacama. La magnitud de esta recarga alcanza cifras de importancia en relación a los caudales con que se trabaja en la zona, debido a las altas tasas de riego utilizadas. Las elevadas tasas de riego en la zona son producto de la necesidad de provocar el lavado de los suelos en conjunto con el riego, por alta con

CORPORACION DE FOMENTO DE LA PRODUCCION
DEPTO. RECURSOS HIDRAULICOS



SALAR DE ATACAMA

LEYENDA

- CONTACTO DEL SALAR
- CURVA DE NIVEL
- POZOS

SUPERFICIE FREATICA

centración de sales disueltas de las aguas utilizadas (ríos San Pedro y Vilama), que en caso de no usarse este procedimiento, se irían concentrando por evaporación en la superficie de ellos.

La recarga total por regadío quedará constituida entonces, por la fracción de agua utilizada en la zona misma de riego que pasa al acuífero por infiltración. Puede considerarse al menos que un 40 a 50% del agua aplicada podría constituir recarga.

Bajo tales condiciones puede estimarse que el total de agua recargada en el Norte excluyendo los aportes de quebradas, llega a ser de 400 lts/seg.

Movimiento: El movimiento general del agua subterránea posee dirección Norte-Sur, más es preciso independizar el sector occidental del área Norte, en que el escurrimiento tiene marcada dirección Sur-Oeste.

Las gradientes hidráulicas del sector, presentan reducida magnitud y tienen un promedio de 4 o/oo. En general pueden considerarse homogéneas, aunque cabe destacar una disminución de él en dirección a la Laguna Sejar y un aumento en la zona comprendida entre Las Dunas y Tambillo. Estas variaciones de gradiente se estima no deben ser interpretadas como condiciones de descarga, según se verá mas adelante.

De acuerdo a la descripción litológica de los materiales atravesados por los sondeos perforados en el área, la permeabilidad no excedería a 20 mts./día para el acuífero freático. Ello es equivalente a acotar la transmisibilidad, a un máximo de $1.000 \text{ m}^3/\text{d}/\text{mts.}$, (suponiendo un espesor de acuífero homogéneo equivalente a 50 mts.) Este valor de permeabilidad, asociado al promedio de las gradientes obtenidas para el sector, trae como consecuencia una velocidad de escurrimiento del acuífero freático de 8 cm/día, velocidad que supone un lapso aproximado de cientos de años para el recorrido entre la supuesta zona de recarga y su descarga. Para el caso de Chaxas se ha estimado un período de 500 años.

Esta misma estimación de permeabilidad permite calcular el caudal subterráneo proveniente del Norte, pasante por la equipotencial de 2.366 mts. en 650 lts./seg.

Descarga: La descarga artificial es de reducido monto y podemos ignorarla frente a la descarga natural que se produce por evaporación, evapotranspiración de freatófitas y drenaje.

El drenaje, único en el borde del Salar hacia un cauce superficial, se produce hacia el río San Pedro en su curso inferior.

La descarga por evapotranspiración se produce no solo en las zonas de cultivo, sino también en la abundante vegetación freatófita existe fuera de esas zonas. La evaporación, en cambio se produce ya sea directamente desde el suelo por capilaridad, o bien desde la superficie misma del agua en aquellas zonas que la napa freática intercepta la superficie del terreno.

La descarga por evaporación desde el suelo puede considerarse ya como importante en aquellos sectores en que la superficie freática se encuentre a una profundidad inferior a 4 mts. de la superficie del terreno. Sobre el plano de equipotenciales ha sido dibujado (línea de puntos) el límite de la zona de profundidad inferior a 4 mts. y puede observarse la concordancia existente entre este límite y el límite mismo de la costra salina.

La evaporación desde el suelo (así como la evapotranspiración) produce descarga de agua no concentrada, juntamente con el escurrimiento horizontal, produciendo en él una disminución de caudal y, por consiguiente (a igualdad de permeabilidad), una disminución de gradiente (proximidades de Laguna Sejar).

El sector oriental (siempre en la zona Norte) muestra un aumento de gradiente en las vecindades de Tambillo, originado por condiciones topográficas ya que el terreno en ese lugar tiene un bajo, permitiendo así la presencia de una zona de vegas y, por ende, una concentración de descarga.

El Gráfico Nº 11 muestra un corte esquemático según la línea de sondajes 24 al 32 y cuya orientación es prácticamente Este-Oeste. En él se aprecia un bajo topográfico en las vecindades de los sondajes 26 y 27, juntamente con una zona depresionaria de nivel estático, en el mismo sector, provocada por una descarga por evapotranspiración de mayor intensidad.

b) Borde Oriental.-

Recarga: La recarga del acuífero freático se produce a lo largo de todo el borde del Salar y, fundamentalmente, a la entrada de las quebradas en los depósitos aluviales. Es en estos puntos donde el agua proveniente de precipitaciones o derretimiento de nieves en la alta cordillera, y que escurre por las quebradas en lechos prácticamente impermeables (fundamentalmente liparitas) hasta esta zona, se infiltra pasando a formar el escurrimiento subterráneo.

Las zonas de recarga, debido a las condiciones topográficas del Salar, se encuentran a distancias muy variables de las áreas de descarga como, asimismo, de la franja en que ha sido posible la obtención de la superficie freática. Esto trae consigo que aquellas zonas de recarga alejadas de esta franja muestren sus efectos muy amortiguados (zona central y norte); en cambio, el efecto se evidencia intensamente en la zona Sur (quebrada de Peine) en donde esta franja se encuentra muy próxima a la zona de recarga.

Movimiento: En el tramo comprendido desde Socaire al Norte y en la franja cubierta por las equipotenciales, se manifiesta un escurrimiento de dirección Sur-Oeste; sin embargo, esta componente sur del escurrimiento está más bien relacionada con la inclinación general Norte-Sur del Salar. Desplazándose hacia los puntos de recarga es esperable encontrar un escurrimiento de tendencia Este-Oeste.

Frente a la quebrada de Socaire, el escurrimiento se muestra de dirección Este-Oeste y, ya frente a Peine, tiene una marcada orientación Nor-Oeste.

El Gráfico Nº 15 muestra un corte idealizado, basado en los sondeos construídos, de dirección Norte-Sur, la topografía del borde del Salar y la ubicación de la superficie freática, que permite explicar estos cambios de dirección observados, a través de las condiciones topográficas. En él se manifiesta un bajo en el pozo Nº 60 que, continuando hacia el Salar, da origen a los afloramientos de agua que se producen en la Laguna Linque.

La generación de este acuífero para todo el Borde Oriental se ha debido al mismo mecanismo (rellenos aluviales de las quebradas, con material de mala clasificación), por lo que en una primera aproximación podemos asignarle una permeabilidad similar pero, en ningún caso la transmisibilidad del acuífero podría considerarse homogénea, debido fundamentalmente a los distintos espesores de saturación.

Este fenómeno puede ser indirectamente visualizado a través de los gradientes hidráulicos y, es así como en sector Tambillo-Aguas Blancas, en que el espesor de acuífero saturado es de importancia, el gradiente hidráulico tiene un valor moderado (3 o/oo), creciendo fuertemente en la zona de Peine, en que el espesor de saturación es reducido y llegando a calcularse un gradiente hidráulico de 1%.

Desde luego, no sólo la menor transmisibilidad condiciona este aumento de gradiente sino, también, como en las proximidades de la Laguna Linque, la presencia de estas descargas concentradas.

Descarga: Ella se produce fundamentalmente por evaporación en el Salar, tanto desde el suelo como desde la superficie de agua y secundariamente, por el consumo de plantas freatófitas. No hay descarga por explotación humana.

c) Sector Sur.-

Recarga: La recarga desde el límite Sur es improbable y escasa debido a la baja precipitación que existe en la zona. Esto es especialmente válido para Tilopozo en que toda su hoya se extiende en esa

SALAR DE ATACAMA

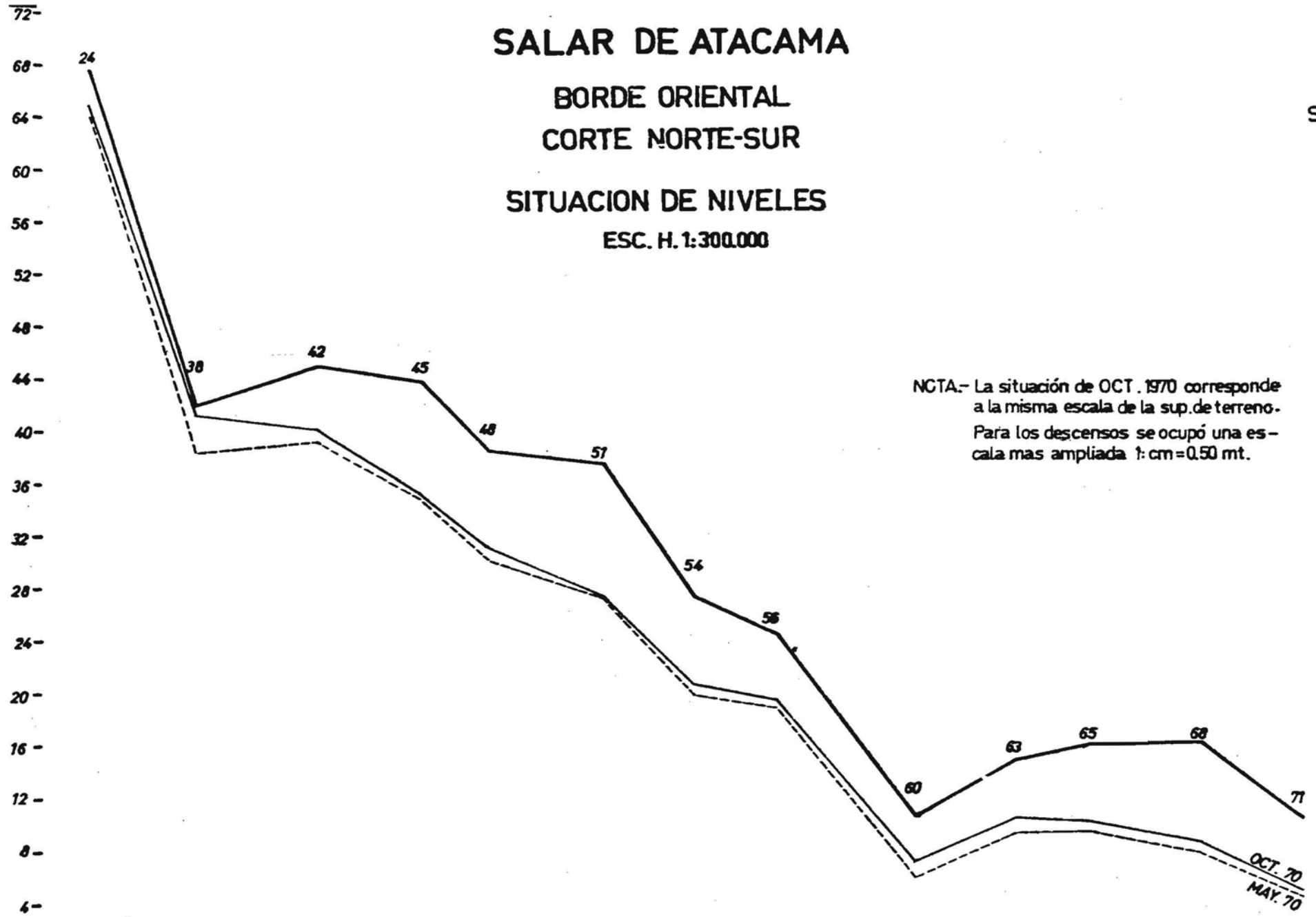
BORDE ORIENTAL
CORTE NORTE-SUR

SITUACION DE NIVELES

ESC. H. 1:300.000

NORTE

SUR



NOTA.- La situación de OCT. 1970 corresponde a la misma escala de la sup. de terreno. Para los descensos se ocupó una escala mas ampliada 1:cm=0.50 mt.

2 300 -

GRAFICO Nº 15

dirección. El caso de Tilomonte es levemente distinto, ya que cuenta además con los recursos que le proporciona la quebrada de Tarjne que se desarrolla en la Cordillera de los Andes, y es considerada como de importancia entre las quebradas del Salar.

Movimiento: En Tilomonte, el flujo subterráneo tiene un escurrimiento orientado hacia el Nor-Oeste, evidenciando la mayor importancia que tiene la contribución de Tarjne. El gradiente hidráulico medio tiene un valor de 2 o/oo.

En Tilopozo, en cambio, el flujo orientase en dirección Norte, siendo el gradiente hidráulico excepcionalmente fuerte, alcanzando un valor superior a 1%. El poco usual gradiente es provocado por la abrupta topografía de la zona.

Basándonos en este fuerte gradiente en Tilopozo, sumado a las pocas posibilidades de una recarga importante, y comparando con la situación de Tilomonte, podemos concluir que la transmisibilidad promedio del acuífero freático de esta última zona es muy superior a la de Tilopozo.

La permeabilidad de la zona freática de Tilomonte, puede ser asimilada a la que poseen los materiales de la misma zona en el Borde Oriental.

Descarga: Al igual que en la mayor parte del Salar, la descarga se produce por evaporación y evapotranspiración. No hay descarga artificial.

C A P I T U L O N O 5BALANCE DE AGUAS5.1. Generalidades.-

No se podría intentar un balance hidrológico de Aguas, por existir una serie de incógnitas que no son posibles evaluar dado los pocos antecedentes existentes en el área.

En efecto:

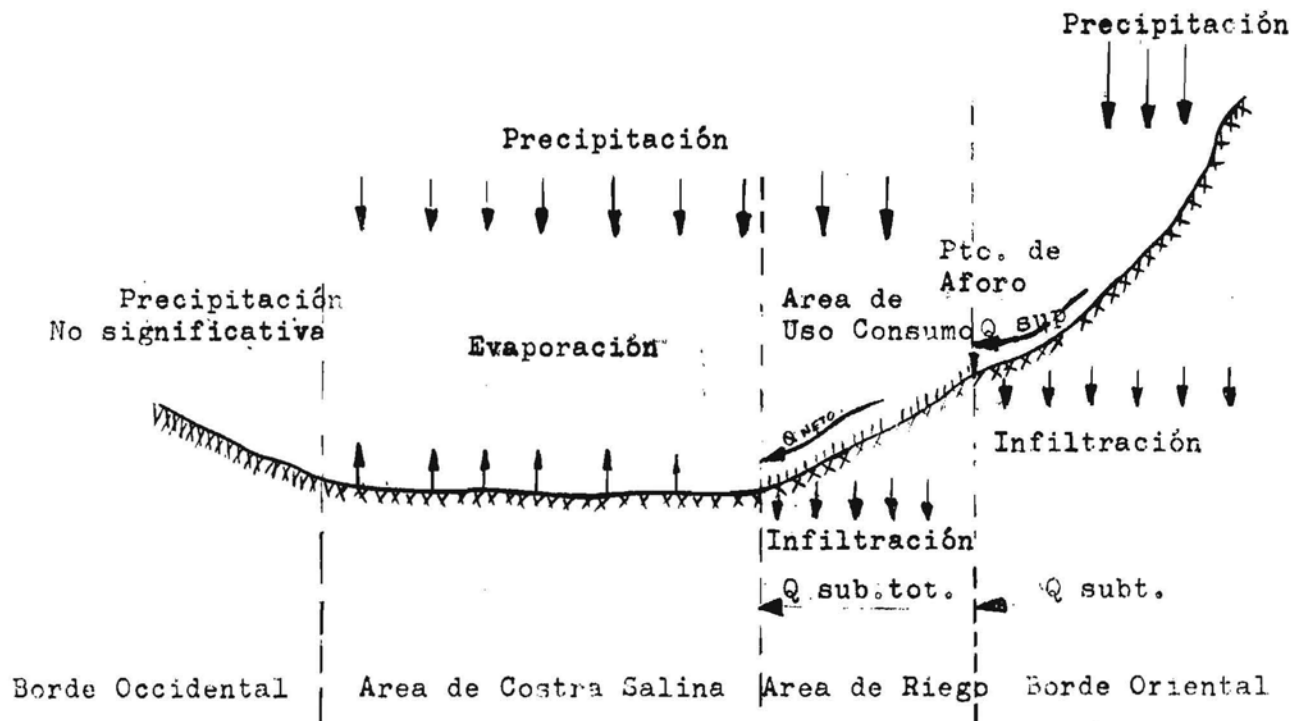
- a) Se desconoce si la relación altura-precipitación es un buen reflejo de la lluvia promedio para los bordes oriental y norte dado los casi nulos antecedentes sobre el particular.
- b) Se desconoce el gasto medio efectivo de la mayoría de las quebradas, por la inexistencia casi total de aforos, salvo unos pocos aislados realizados últimamente en forma sistemática a partir de Octubre de 1970.
- c) En cuanto a evaporación en la hoya, sólo se cuenta con la potencial en base a expresiones empíricas conociéndose su cuantía desde los distintos tipos de suelos sólo en base a extrapolación de experiencias en otras áreas.
- d) Se ignora si la expresión dada por Becerril se ajusta a la realidad de la zona en estudio.
- e) También es una incógnita el caudal subterráneo que por infiltración de precipitación propia de la hoya ingresa al Salar.

Sin embargo, no obstante lo indicado se hará un cálculo de las entradas subterráneas al área bajo costra salina asumiendo un equilibrio en el sistema.

5.2. Estimación de la entrada subterránea sobre la base de una constancia anual de los niveles estáticos.

El análisis de fluctuación de niveles ha sido realizado en el capítulo anterior. Sin embargo, para los efectos de estimar el volúmen subterráneo afluente al Salar podría considerarse que éstos no han variado significativamente. En base a esta hipótesis se podría afirmar que el volúmen evaporado en un año en el área de costra salina es igual al que ingresa.

Si se considera como sistema de análisis el embalse subterráneo bajo la costra salina como se ilustra en el esquema de la figura



Las entradas serían:

67.-

- a) Precipitación sobre el área del sistema (3099 Km²)
- b) Gasto afluyente superficialmente
- c) Gasto afluyente subterráneamente

Como salida se tendría:

- d) Evaporaciones del embalse bajo la costra salina y lagunas

Análisis de entradas.-

- a) Precipitación sobre el sistema:

Considerando que la superficie del sistema es de 3099 Km² y que se ubica a una cota media de 2.200 mts. s.n.m., la intensidad de lluvia promedio que le corresponde de acuerdo al gráfico 6 es de 12 milímetros. Cifra que en volúmen para toda el área significa 37,1 HM³ anuales equivalentes a 1177 lts/seg.

- b) Gastos afluyente superficialmente

El gasto afluyente superficialmente aguas arriba de su aprovechamiento en regadío en la diversas quebradas asciende a 1677 lts/seg. según lo medido, cifra equivalente a 53,2 HM³. De este total se supondrá que un 60% ingresa al Salar por infiltraciones en el área de riego o bien por infiltraciones de los excedentes de regadío en zonas aguas abajo de estos puntos empleándose el 40% restante en uso consumo en las areas de cultivo.

Así entonces:

$$\begin{aligned}\text{Volumen afluyente efectivo al sistema} &= 53,2 \times 0,60 = 31,9 \text{ HM}^3 \\ \text{Volumen de uso consumo} &= 21,3 \text{ HM}^3\end{aligned}$$

- c) Gasto afluyente **subterráneamente**.

Dada la absoluta falta de antecedentes sobre esta variable hidrológica se asumirá que el sistema esta en equilibrio. Luego por di

Gasto equivalente = 1975 lts/seg

Este gasto comparado con la precipitación media anual representa un 22,4%. En efecto:

Area total bordes Norte y Oriental = 5427 Km²

Areas hoyas con gasto superficial = 2911 "

Areas de hoyas sin gasto superfic. = 2516 Km²

Precipitación media = 110 mm/año
 Vol. anual caído = 2516 x 10⁶ x 0,110 = 277 HM³
 Escorrentía Subterránea = $\frac{62,2}{277} = 22,4\%$

Cifra que coincide con la calculada por áreas con escorrentía superficial.

Resumiendo las cifras expuestas se tiene el cuadro siguiente para el borde Norte, Oriental y centro del Salar.

	Superficie Km ²	PP	Hm ³ Vol. caído	ENTRADAS Netas		ESCORRENT. al sistema		η %
				Sup.	Subt.	Sup.	Subt.	
Area con escorr. sup.	2911	110	320	31,9	71,5	9,9	22,4	32,3
Area sin " sup.	2516	110	277	0,0	62,2	0,0	22,4	22,4
Lluvias en el sistema	3093	12	37,1	37,1				
			643,1	69,0	133,7			

De acuerdo a la hipótesis de equilibrio entre entradas y salidas del sistema, la suma de las Entradas NETAS tanto superficiales como subterráneas deben coincidir con el volumen medio de evaporaciones anuales. En efecto.

Evaporación media anual = 202,7 HM³
 Suma de Entradas Netas = 69,0 + 133,7 = 202,7 HM³

Expresando las cifras del balance en litros por segundo se tiene:

Gasto Superficial neto entrante:	1005	lts/seg.
Gasto Subterráneo en hoyas con escor. sup.:	2270	" "
Gasto subterráneo en hoyas sin escor. sup.:	1975	" "
Precipitación en el área del sistema:	1178	" "

Tasa de evaporación anual	6.428	lts/seg.
---------------------------	-------	----------

Finalmente es interesante anotar la sensibilidad de las cifras que se han dado. Suponiendo un coeficiente de almacenamiento de 10% y una superficie evaporante de 3.000 Km^2 , el descenso de niveles de un centímetro equivaldría de detectar un desequilibrio entre las entradas y salidas del sistema de $3,0 \times 10^6 \text{ M}^3$ frente a volúmen anual de evaporación estimado en $202,7 \times 10^6 \text{ M}^3$.

C A P I T U L O N º 6

A N E X O S

A N E X O 1

PRECIPITACIONES (mm)
ESTACION SAN PEDRO DE ATACAMA

LAT. 28° 56' LONG. 68° 13' ALT: 2436 mts.

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Totales
1958	0.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1959	0	3.3	9.5	0	0	1	0	0	0	0	0	4.6	18.4
1960	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1961	41.9	0.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42.8
1962	0	3.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.6
1963	19.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19.0
1964													
1965	0	0	22.0	0	0	0	0	0.5	4.5	5.0	0	0	32.0
1966	0	0	0	0	4.5	0	0	0	0	2.0	0	0	6.5
1967	0	6.0	0	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	13.5
1968	3.3	0	1.5	0	5.5	0	0	0	0	- 1	-1	-1	-1
1969	0.5	0.5	0	0	0	0.3	- 1	0	0	0	-1	-1	-1
Tot.	64.7	14.3	33.0	7.5	10.0	1.3	0.	0.5	4.5	7.0	0	4.6	135.8
Prom.	5.9	1.3	3.0	0.7	0.9	0.1	0	0	0.4	0.7	0	0.5	15.1

Valores negativos indican datos no medidos.

A N E X O 2

GASTOS MEDIOS MENSUALES

SAN PEDRO EN CUCHABRACHE m³/seg.

LAT. 22° 47' LONG: 68° 12' ALT: 2585 Mts.

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1947						1.21	1.25	1.22	1.21	1.19	1.14	1.10
1948	1.02		0.82	0.90	1.20	1.21	1.17	1.14	1.17	1.13	1.08	1.09
1949	1.18	1.71	1.33	1.34	1.27	1.11	1.16	1.09	1.07	1.04	0.91	0.92
1950	1.03	1.06	1.16	1.12	1.19	1.00	0.99	1.05	1.05	1.10	1.05	1.14
1951	0.88	0.92	0.97	1.18	1.23	1.27	1.36	1.30	1.23	1.21	1.19	1.22
1952	1.50	0.69	0.69	0.88	1.07	1.25	1.20	1.15	1.10	1.05	1.00	0.96
1953				1.05	1.05	1.00	0.99	0.98	0.95	0.88	0.93	0.99
1954	1.07		1.40	1.20	1.20	1.20	1.10	1.20	1.20	1.20		
1955												
1956	0.92	0.99	0.97	1.03	1.06	1.06	1.00	0.99	1.00	0.93	0.97	0.97
1957	0.99	0.98	0.91	0.95	1.00	1.00	0.96	1.00	1.00	1.00	0.97	1.00

Continuación:

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1958	1.00	0.98	1.07	1.10	1.20	1.23	1.16	1.11	1.12	1.08		1.21
1959	1.14			1.14	1.10	1.07	1.05		0.88	0.88	0.83	0.83
1960	0.87	0.78	0.84	0.86	0.93	0.94	0.93	0.95	0.94	0.93	0.93	0.90
1961		1.19	1.01	1.01	1.07	1.01	0.96	1.02	1.06	1.04	1.00	1.00
1962	1.00	0.93	0.79	0.85	1.11	1.15	1.35	0.94	0.90	0.72		
1963												
1964			0.78	0.85	0.95	0.92	0.85	0.77	0.74	0.73	0.80	0.84
1965	0.85	0.74	0.84	0.81	0.88	0.94	0.94	0.88	0.96	0.81	0.73	0.76
1966	0.75	0.67	0.80	0.83	0.92					0.75	0.75	0.73
1967	0.86	1.22	0.84	0.81	0.85	0.89	1.02					0.91
1968	0.88		0.90	0.91	0.96	0.96	0.85					
1969	0.77								0.79	0.75	0.70	0.73
1970	0.73	0.79		0.76								
G. Med.	0.969	0.975	0.948	0.979	1.065	1.075	1.071	1.049	1.021	0.969	0.936	0.961
==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==	==

A N E X O 3

AFOROS CORFO EN AFLUENTES PRINCIPALES AL SALAR DE ATACAMA

Gasto en lts/seg.

	1 9 7 0			1 9 7 1									Promedio
	OCT	NOV	DIC	E	F	M	A	M	J	J	A	S	
San Pedro	714	676		648	967	1.030	776	1.008	894	1.366	1.151	921	999,8
Vilama	193	219		216	215	195	247	203	234	212	242	225	218,0
Honar	80	60		49	52	25	33	40	38	97	38	42	50,0
Aguas Blancas	165	207		86	140	89	92	124	122	165	157	127	134,0
Soncor	--	--		55	19	17	16	33	40	23	19	35	28,5
Camar	--	0.0		0.0	0.0	5.0	5	2	2	1	2		2,8
Socaire	144	146		176	145	190	164	219	174	142	200	151	168,0
Peine	--	8		9	4.0	15	20	32	52	7	11	12	16,8
Tilomonte	--	98		--	0.0	124	31	35	50	35	48	115	59,0

Nota: Los aforos para las quebradas del borde Oriental y Sur salvo Socaire se han realizado aguas arriba de las áreas de regadío junto al borde del Salar. San Pedro se controla en Cuchabrache y Vilama en Vilama y Socaire en la B.T. del canal Socaire.

C A P I T U L O N º 7

Referencias

Bibliografía

Referencias:

- Datos estadísticos de caudales y precipitación: Dirección General de Aguas y Oficina Meteorológica
- Expresión empírica de evaporación potencial: Meyer
- Relación Altura-Precipitación: F. Rodríguez
- Experiencias de Evaporación desde costra salina: J.M. Toro
- Clasificación de Suelos Salinos en el Salar: R. Bonilla
- Estimación de evaporaciones en la Pampa del Tamarugal: A. Hojas

Bibliografía:

- Elementos Diagnósticos para un Plan de Desarrollo Local en San Pedro de Atacama - U. de Chile - CORFO 1968.
- Condiciones Hidrológicas del Escurrimiento Superficial y Subterráneo en el Norte Grande - Guennady Golubev - 1968.
- Geología de Superficie, Subsuperficie y Calidad química en el Salar de Atacama (CORFO, 1972)
- Plan de Riego de San Pedro de Atacama (Hans Niemayer)
- Estudio de los ríos San Pedro y Vilama - Fernando Alamos C.