



# Integrated Water Resources Management in Drought Risk Management

Monterrey, 24 al 28 de junio de 2010

Groundwater, Drought and the Tragegy of the Commons in Mendoza, Argentina

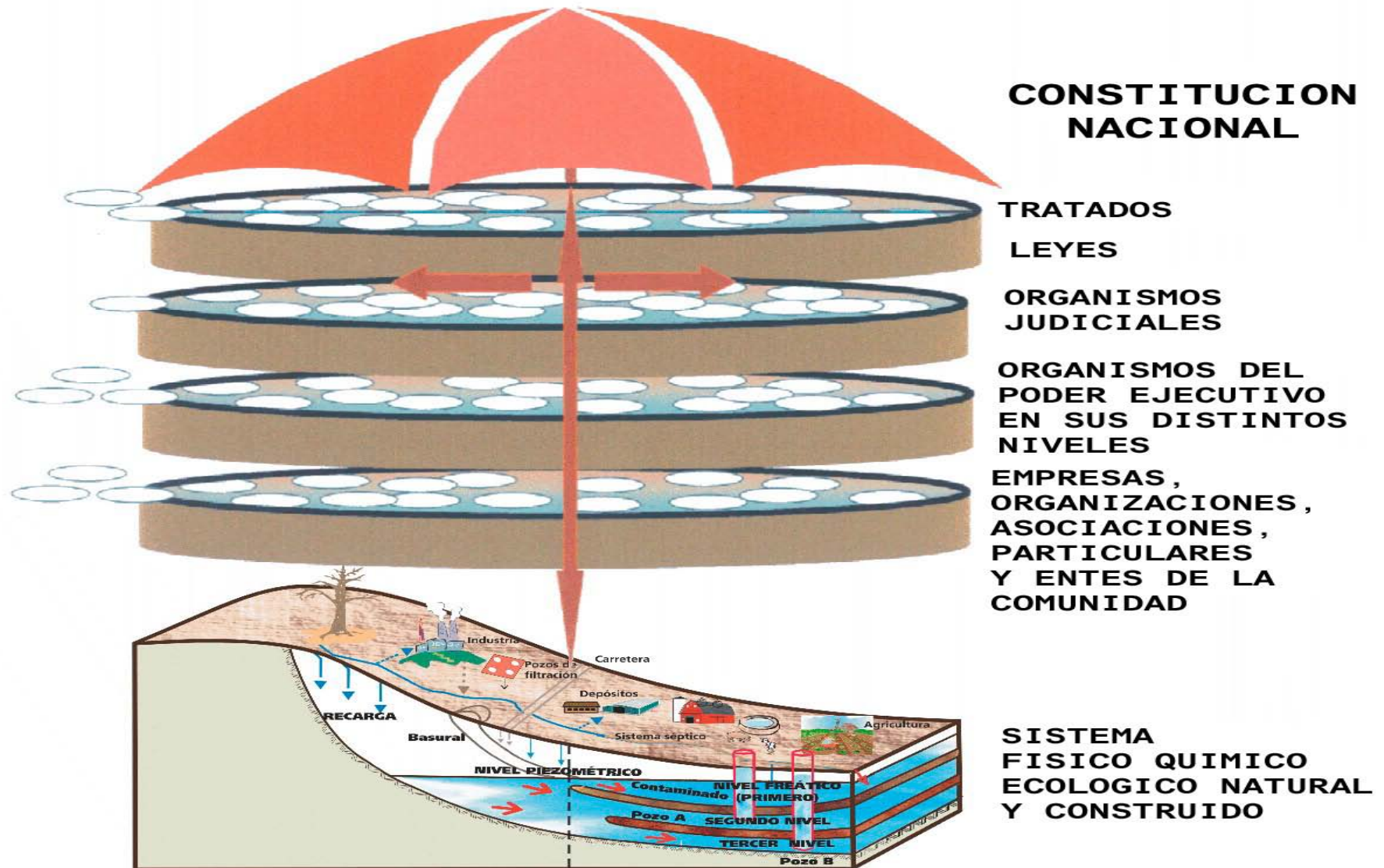
Dr. Armando Llop



# Contenidos

- Presentación de la cuenca Norte de Mendoza
- Caracterización del agua subterránea.
- La gran sequía del siglo XX, de impactos evitados por el agua subterránea
- Los impactos a futuro de la gran expansión

# La Cuenca Norte de Mendoza





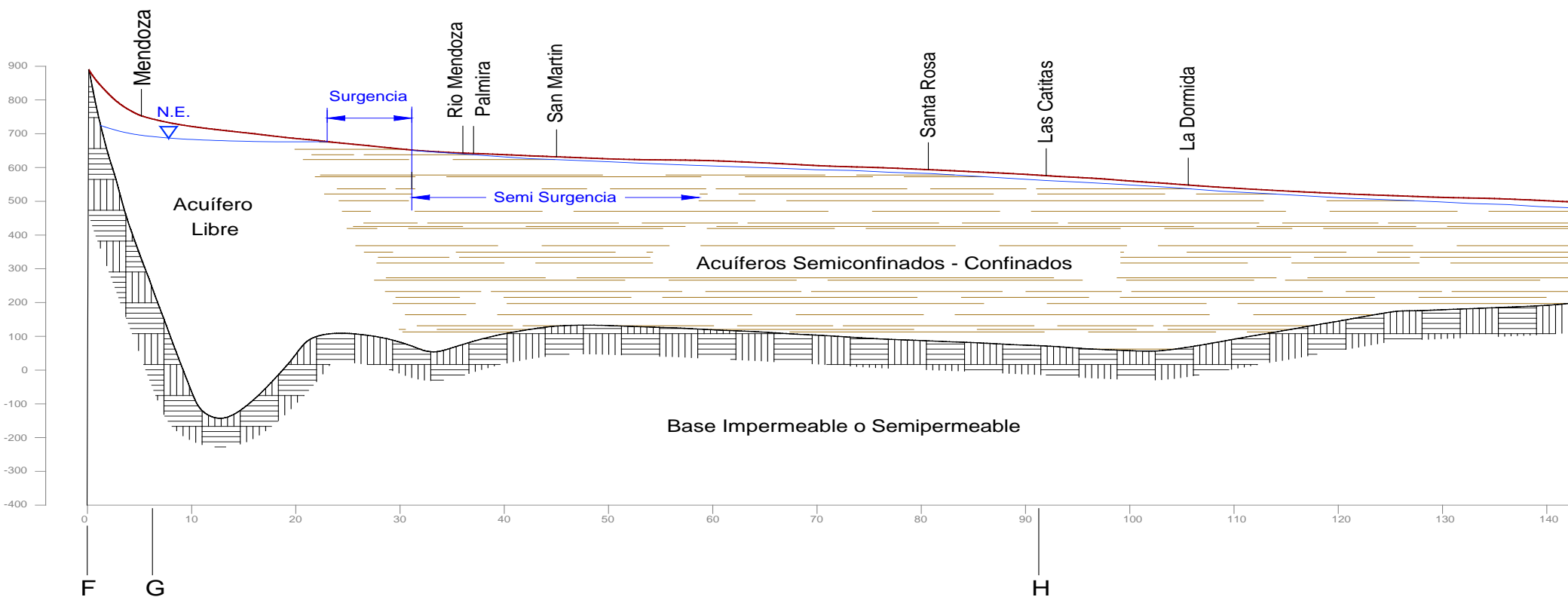
# Cuenca de los Ríos Mendoza y Tunuyán Inferior

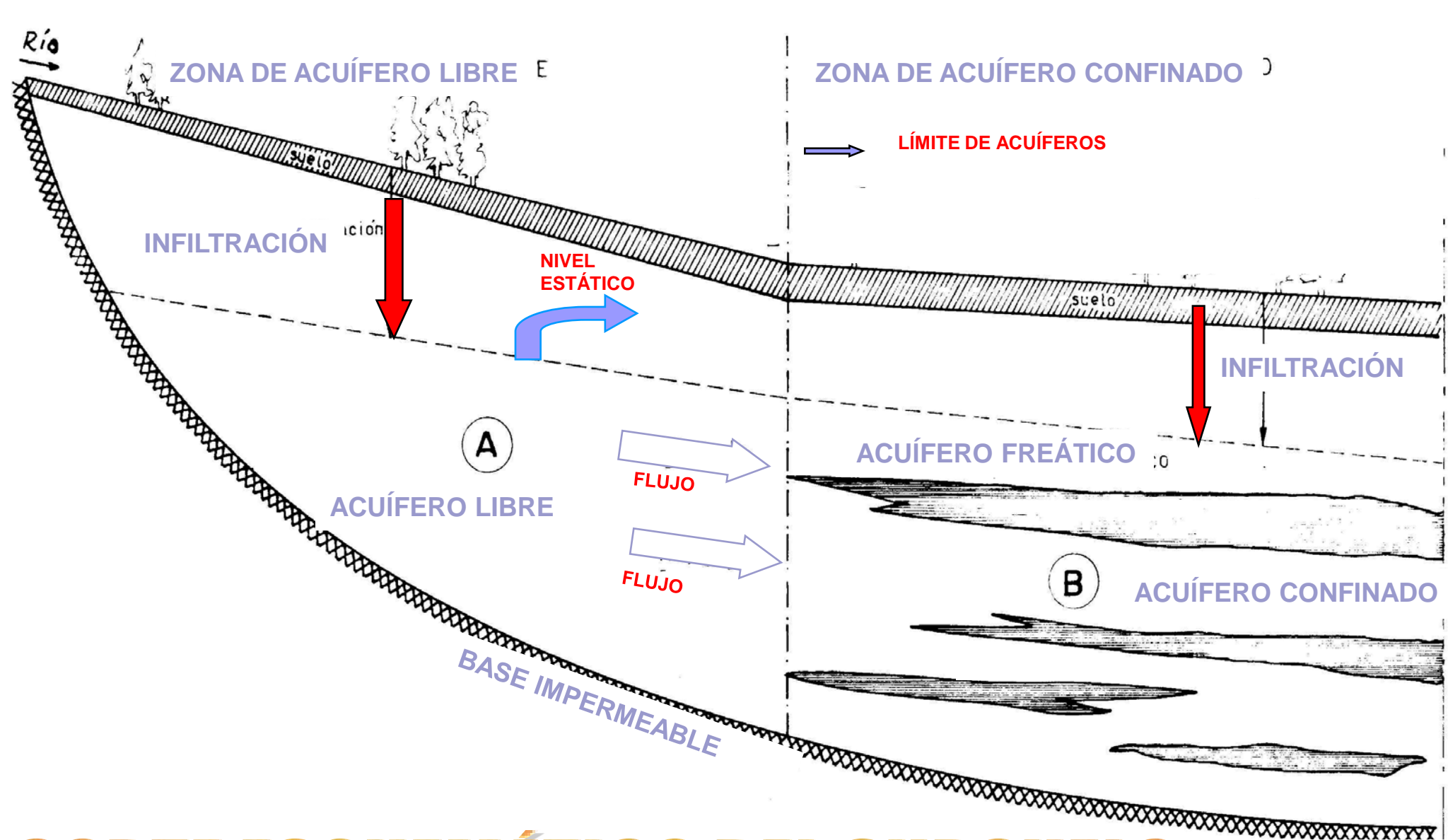


# PERFIL FGHF

Trazado a lo largo de la RN 7 desde la Ciudad de Mendoza hasta La Paz

## PERFIL F-G-H-F





# CORTE ESQUEMÁTICO DEL SUBSUELO





# Algunas cifras de la Cuenca Norte de Mendoza

- Unidad hidrogeológica alimentada por los ríos Mendoza y Tunuyán inferior.
- El Río Mendoza aporta unos 1.500 hm<sup>2</sup>, unos 47,5 m<sup>3</sup>/seg.
- Extensión total del orden de los 22.000 km<sup>2</sup>
- Población de más de 1.000.000 de personas
- Mendoza cuenta con un 4 a 5% de los valores nacionales de PBI y población.
- Precipitación 200 mm./año
- 160.000 has. bajo riego; 70% con acceso a agua subterránea (42% con uso conjunto y 28% exclusiva)
- El agua subterránea es la única fuente de agua potable al Este del río Mendoza
- El agua subterránea es la principal fuente de uso industrial.
- El 27% del agua potable es de origen subterráneo.
- De los 19.750 pozos registrados en esta Cuenca, el 50% activos.

# Mapa Institucional:

DGI Sede Central, Subdelegaciones.  
Inspecciones de Cauce  
Asociaciones de Inspecciones  
Dirección de Hidráulica  
Poder Legislativo (Senado, Diputados)  
Municipios  
Ministerios de Infraestructura y Vivienda  
Secretaría de Ambiente  
Secretaria de Turismo  
Defensa Civil  
Empresas Hídricas de servicios:  
OSM SA  
EDEMESA.  
HINISA  
HIDISA  
Cooperativas Eléctricas y/o de Agua  
Potable

Entes Reguladores de Servicios  
Públicos

EPRE

EPAS

ENRE

Organismos de CyT

Universidad Nacional De Cuyo

Universidad Tecnológica  
Nacional

CCT Mendoza (ex CRICYT)

IANIGLA

IADIZA

Instituto Nacional del Agua

CRA

CELA

Consejos Profesionales

ONG's

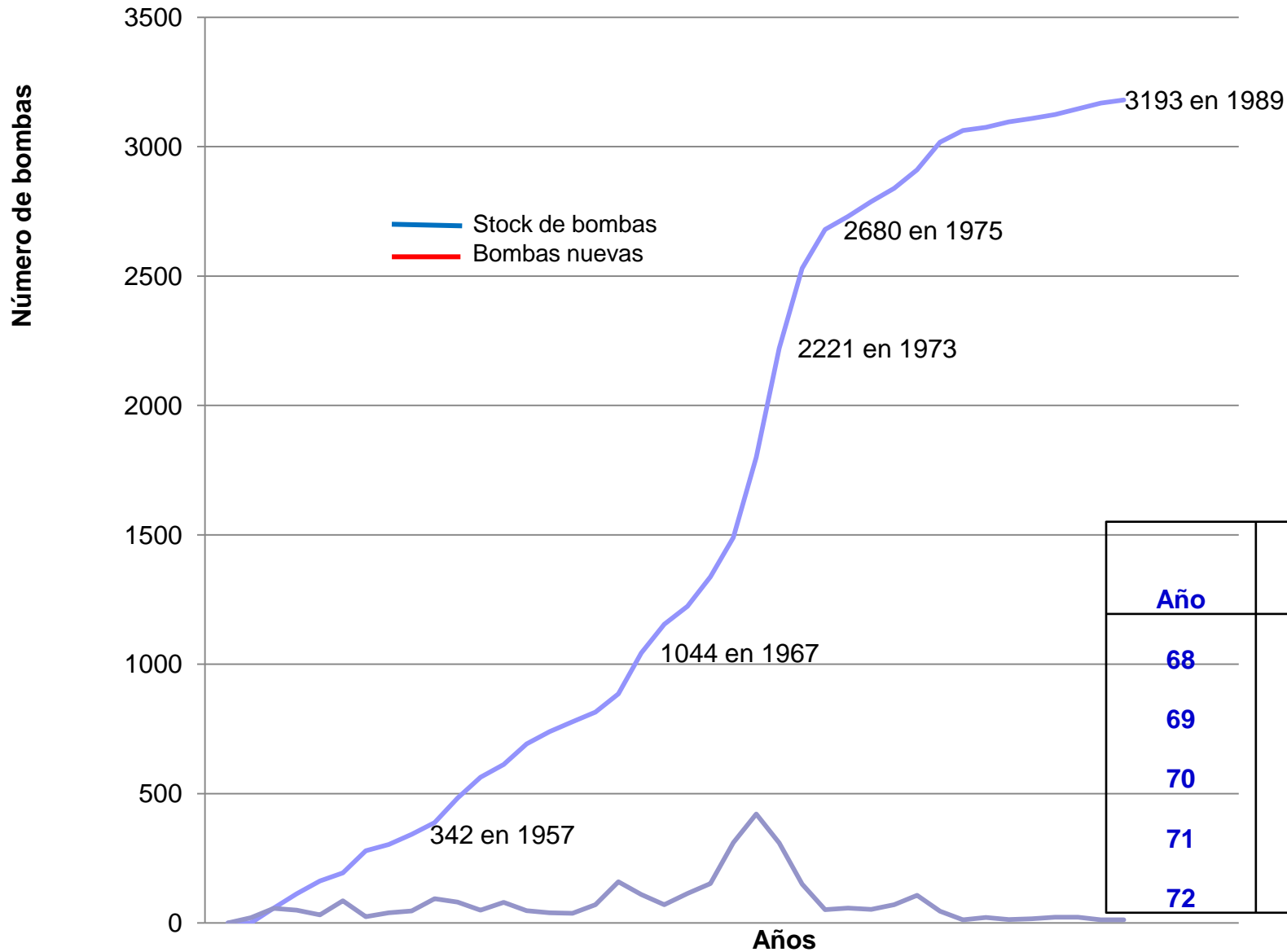
# Aspectos Normativos e Institucionales

- En Argentina el manejo del agua es jurisdicción de las provincias.
- El DGI está creado por Ley, y constituye el Gobierno del Agua.
  - Tiene atribuciones legislativas, judiciales y ejecutivas sobre el agua.
  - Maneja la totalidad de las concesiones, pero
    - Se dedica casi exclusivamente al riego
    - Atiende casi exclusivamente al agua superficial
    - No coordina institucionalmente con otros organismos
  - En materia de riego es muy descentralizado, vía Inspecciones de Cauce
- Leyes relevantes son:
  - Ley provincial de Aguas (1884)
  - Leyes de Aguas Subterráneas (1974)
  - Ley del Ambiente
  - Ley de Obras Públicas
  - Leyes de Concesiones de Servicios (agua potable, electricidad)
  - Una multitud de Leyes y normas que afectan al sector.

# El advenimiento del agua subterránea en la Cuenca

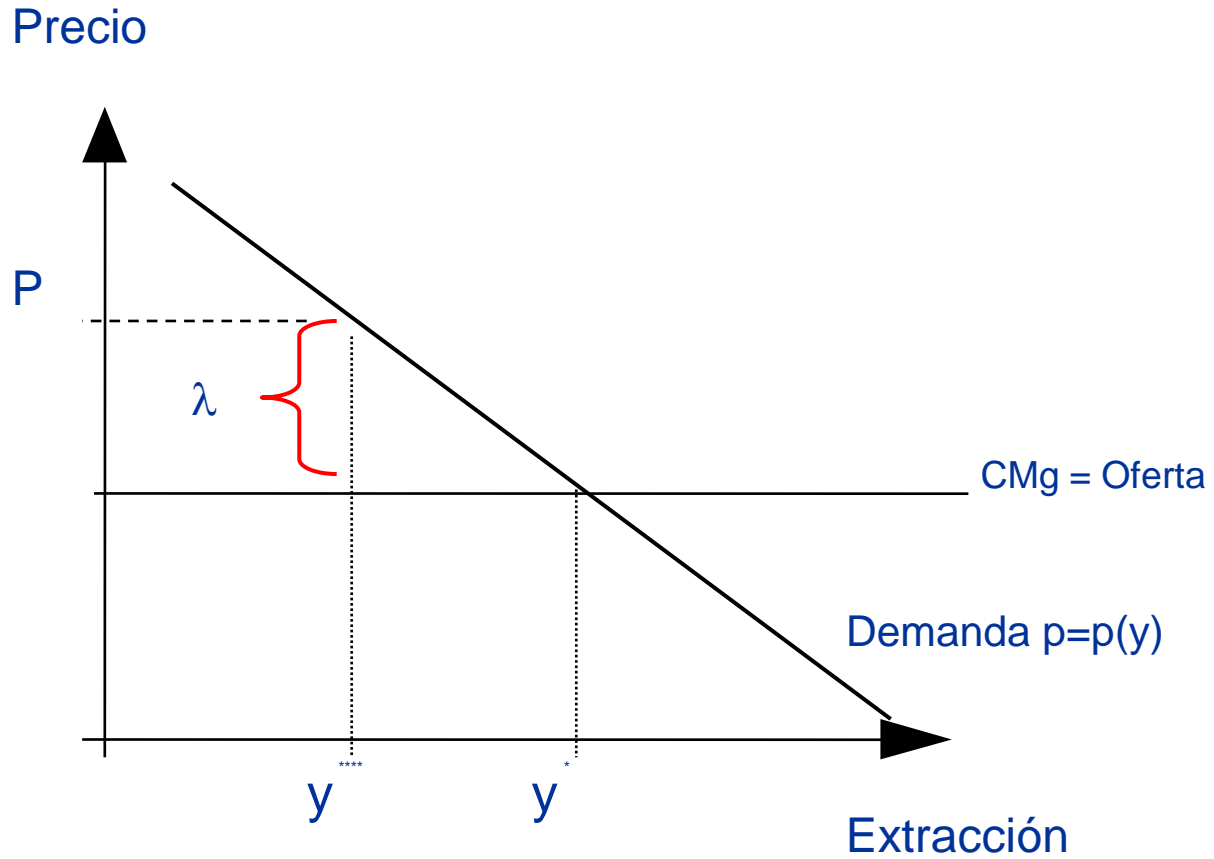
- En la década de los 40 y 50, el agua freática era buena
- A fines de los 40, se inicia la explotación del agua subterránea
- Entre fines de los 60 y principios de los 70, se da una gran expansión de pozos, causados por:
  - Una muy alta rentabilidad para el sector agropecuario
  - Fuertes desgravaciones a las inversiones en la zona árida
  - Secuencia de 5 años profundamente secos
- Los gráficos y tabla a continuación ilustran el tema.
- Por fortuna el sistema subterráneo recuperó en unos pocos años.
- Nos quedaron las lecciones aprendidas de los impactos:
  - Sobreexplotación volumétrica en a el corto plazo
  - Salinización en el mediano y largo plazo
  - El rol del agua subterránea para mitigar los efectos del CC.

# Evolución del número de pozos en San Martín

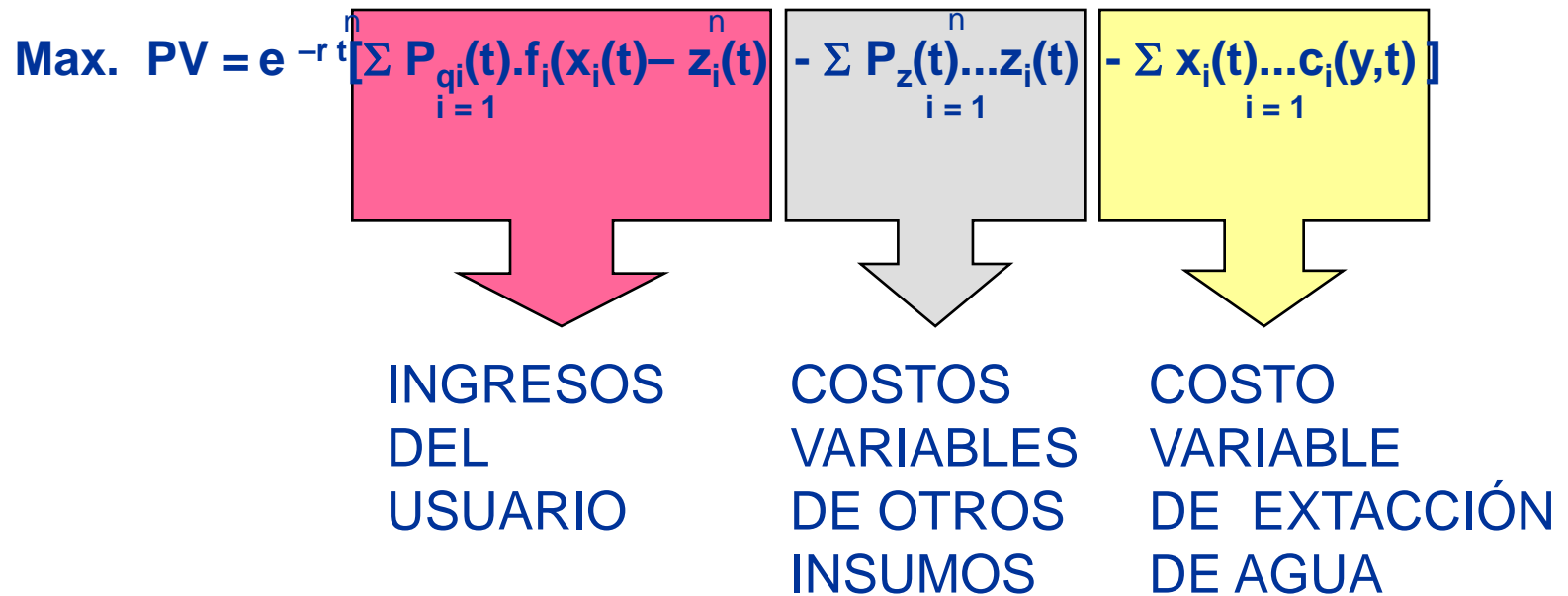


<b>Año</b>	<b>Derrame (hm3)</b>	<b>Bombeo (hm3)</b>
<b>68</b>	<b>1023</b>	<b>539</b>
<b>69</b>	<b>803</b>	<b>648</b>
<b>70</b>	<b>1327</b>	<b>379</b>
<b>71</b>	<b>830</b>	<b>868</b>
<b>72</b>	<b>1083</b>	<b>544</b>

# Interpretación de la externalidad Volumétrica



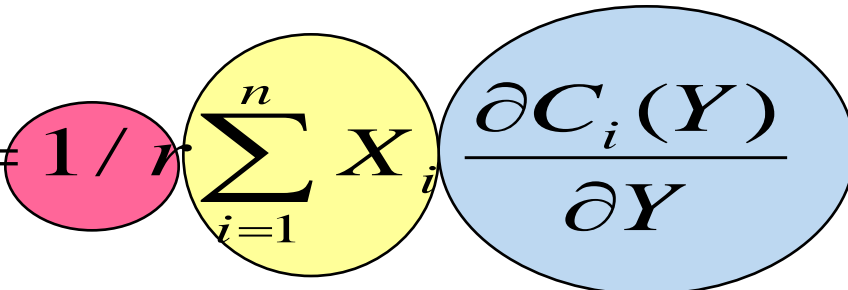
# Cálculo de las externalidades por reducción del Stock del agua subterránea



SUJETO A

$$Y(t) = R(t) - \sum_{i=1}^n x_i$$

## Ecuación para estimar las externalidades

$$I_j = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^n X_i \frac{\partial C_i(Y)}{\partial Y}$$


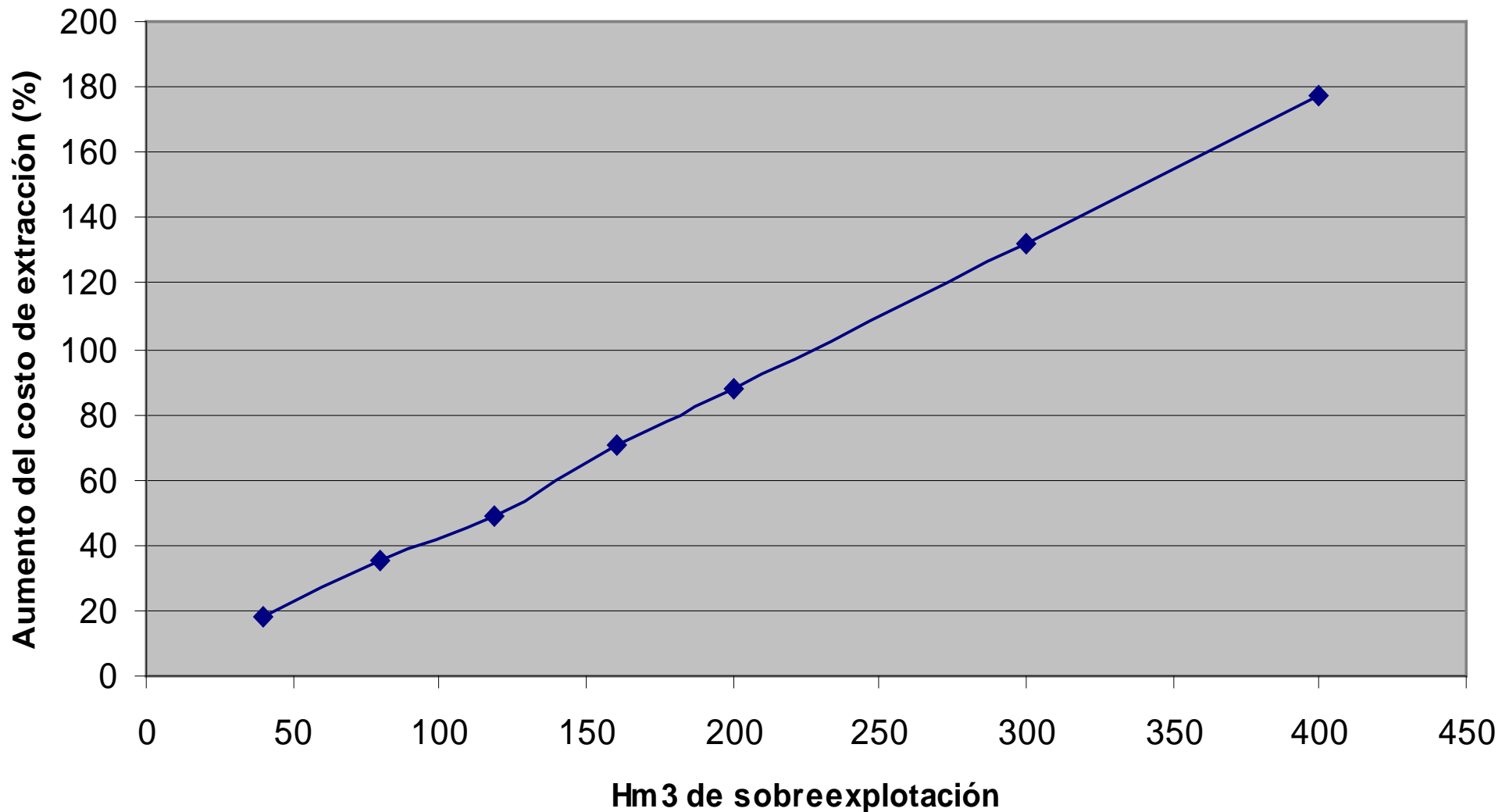
La expresión tiene 3 componentes que deben estimarse para su evaluación:

- ✓ Tasa de descuento
- ✓ Estimación del volumen de agua extraído
- ✓ Conocer los cambios en costos de extracción causados por cambios en el stock de agua subterránea.

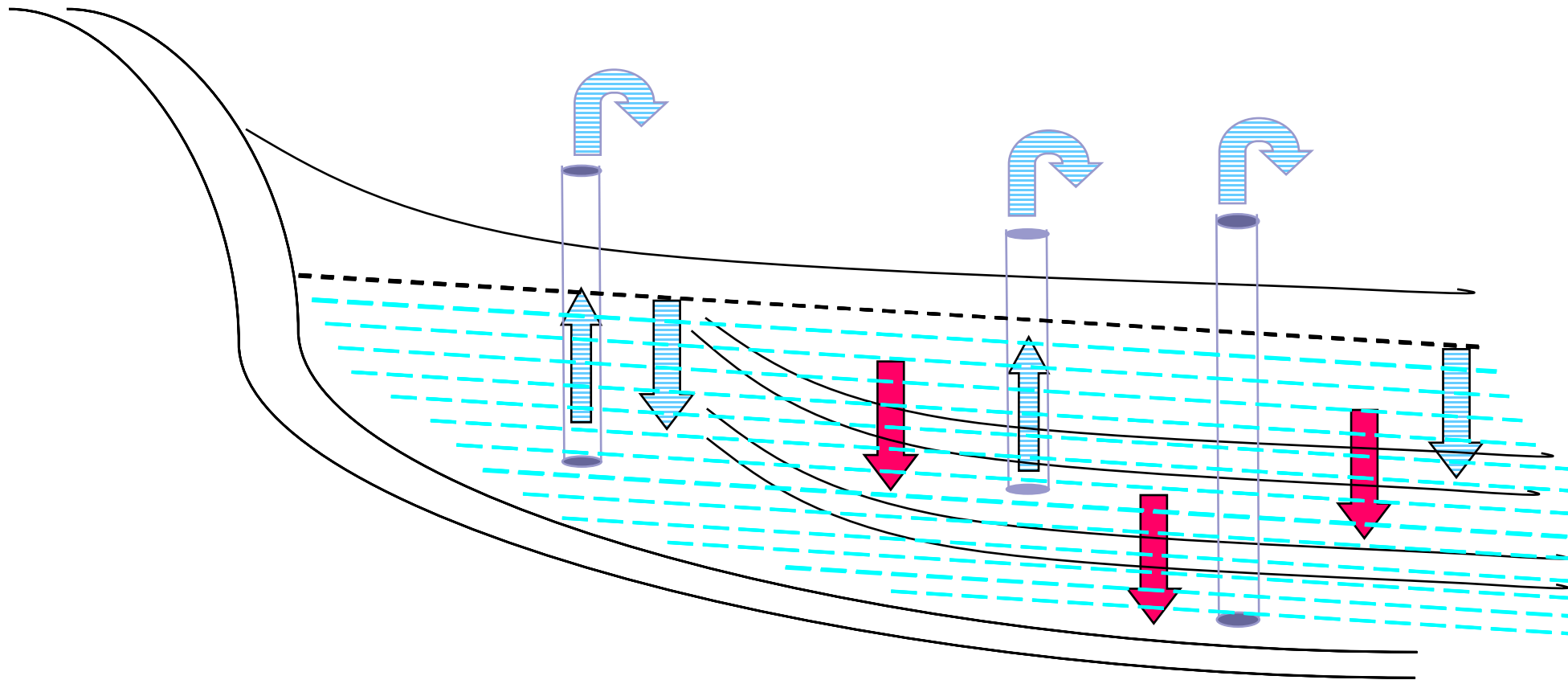


Profundidad de bombeo (m)	Reducción anual del stock subterráneo (-Y <sub>t</sub> ) (hm <sup>3</sup> )						
	40	80	118,4	160	200	300	400
<b>Impuesto (% sobre costos variables privados)</b>							
5	53	106	148	212	265	397	530
10	26	53	74	106	132	199	265
15	18	35	49	71	88	132	177
20	13	26	37	53	66	99	132
25	11	21	30	42	53	79	106
30	9	18	25	35	44	66	88
50	5	11	15	21	26	40	53
70	4	8	11	15	19	28	38
90	3	6	8	12	15	22	29

## Costo en función de la sobreexplotación

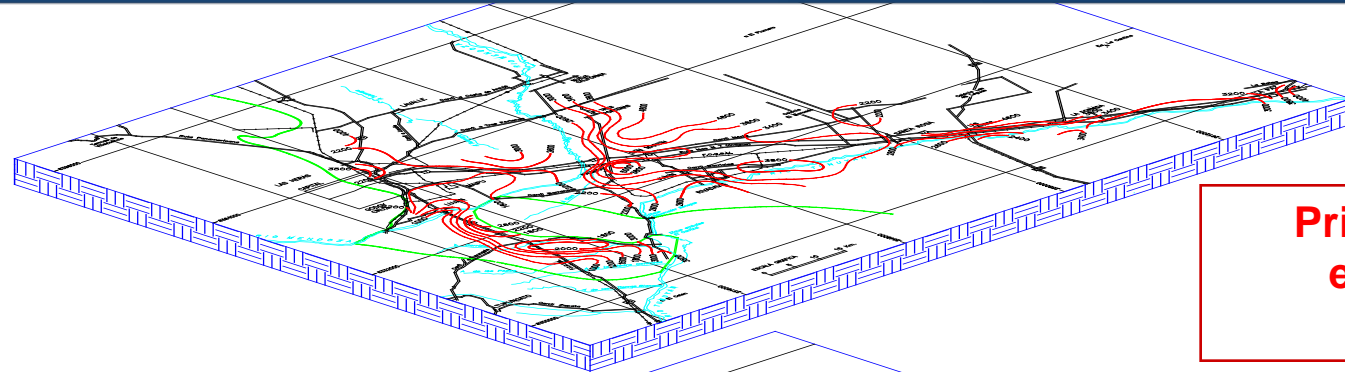


# Las externalidades por salinización

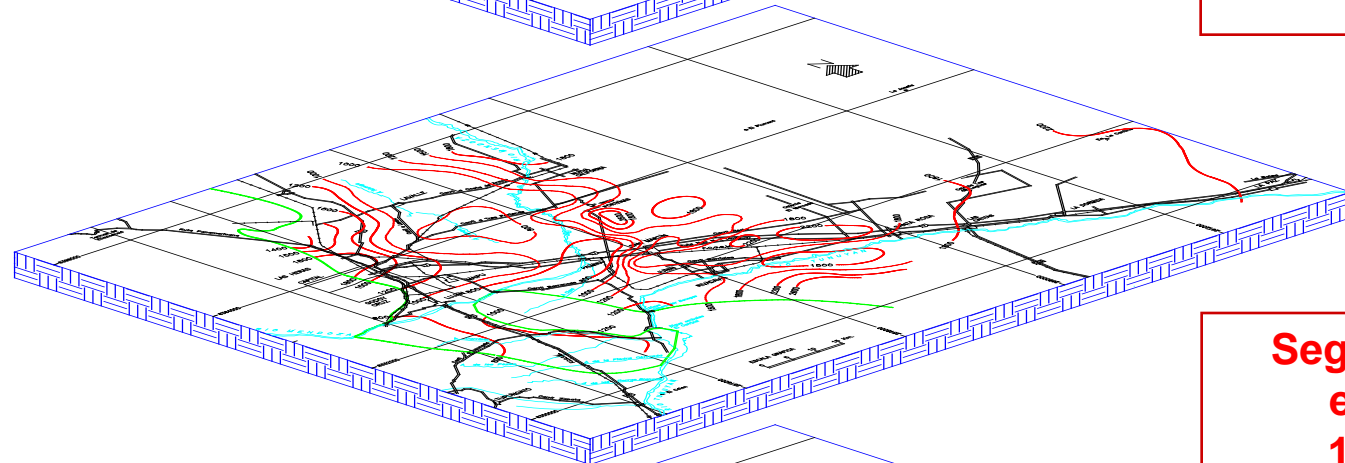


# Bloc de salinidad del agua subterránea

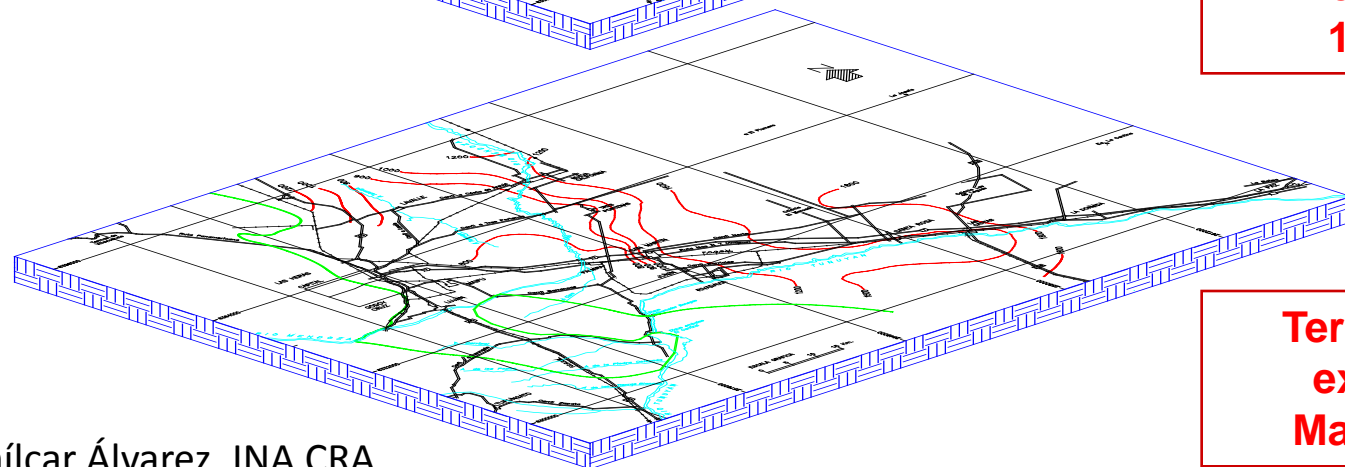
## Estratificación vertical



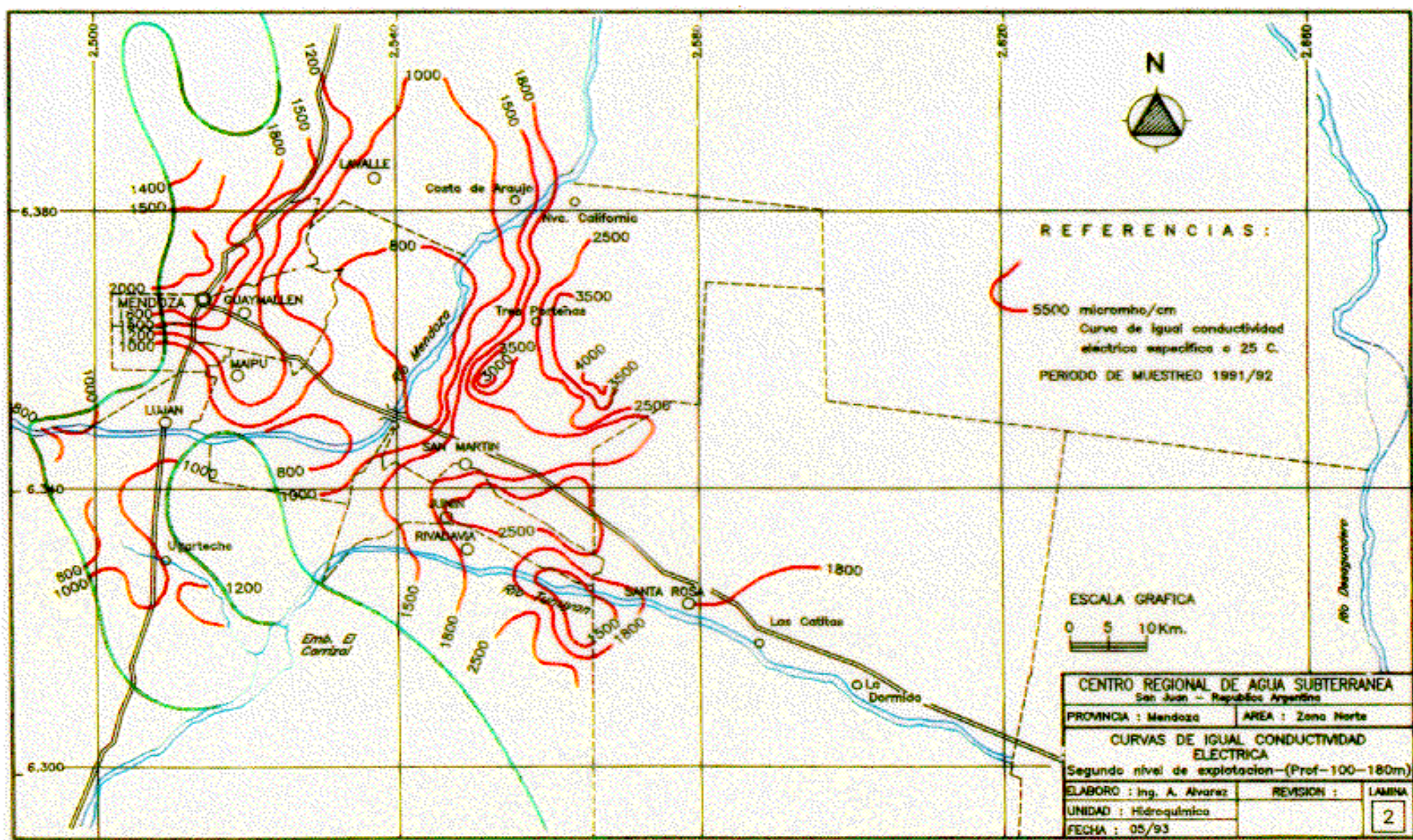
**Primer nivel de explotación**  
**0 – 80 m**



**Segundo nivel de explotación**  
**100 – 180 m**



**Tercer nivel de explotación**  
**Mas de 200 m**



**REFERENCIAS :**

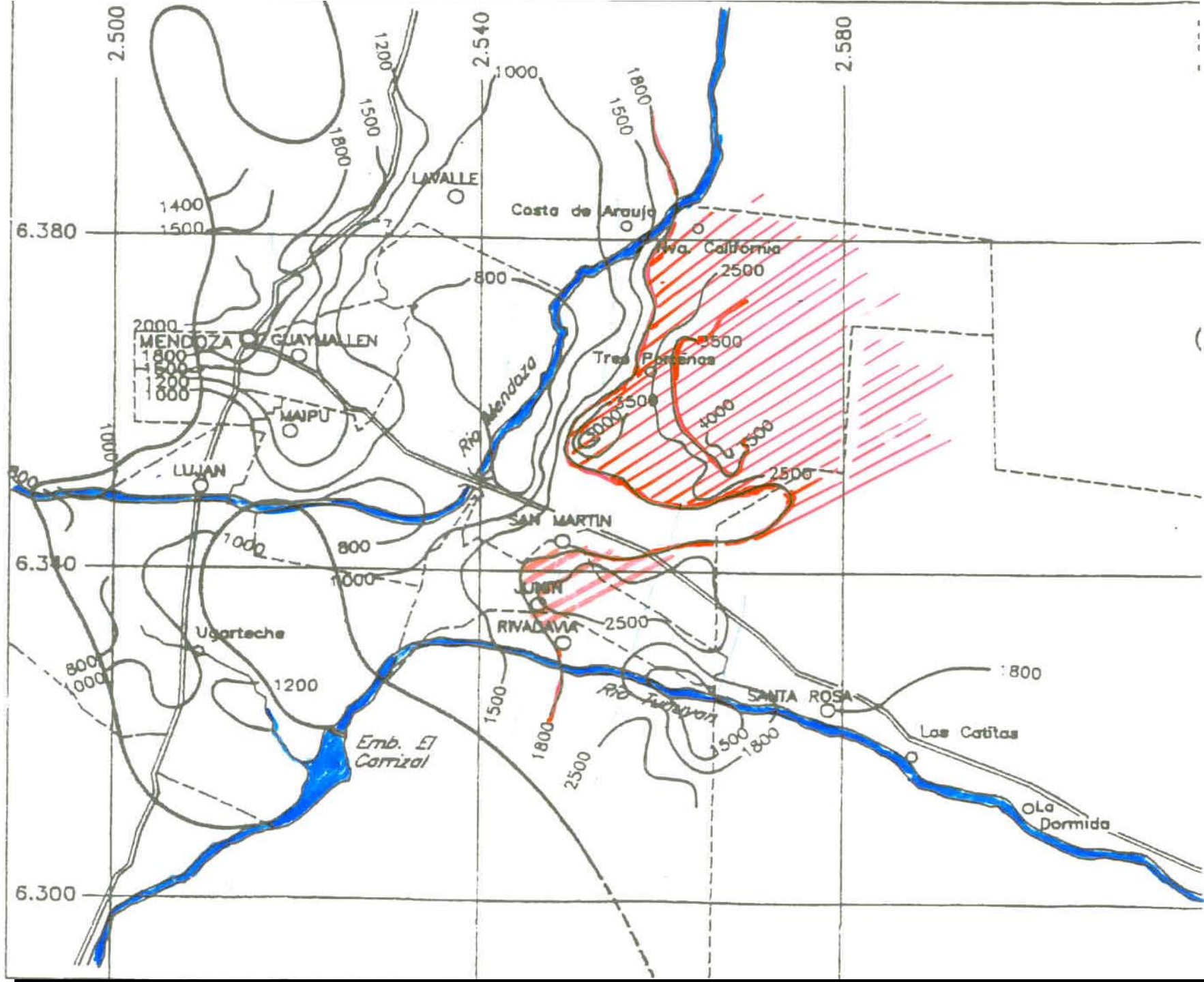
5500 micromho/cm  
 Curva de igual conductividad  
 eléctrica específica a 25 C.  
 PERIODO DE MUESTREO 1991/92

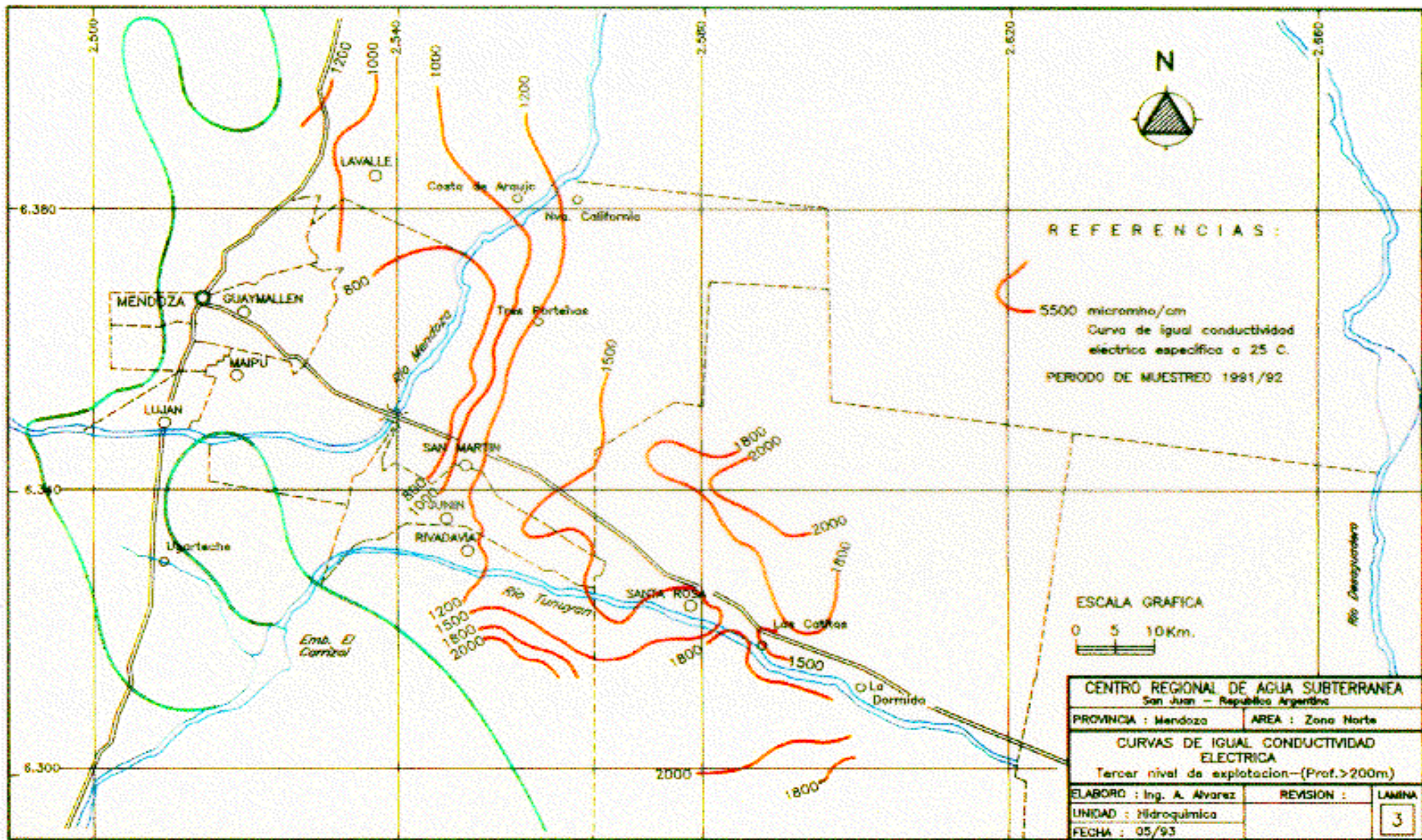
ESCALA GRAFICA



**CENTRO REGIONAL DE AGUA SUBTERRANEA**  
 San Juan - República Argentina

PROVINCIA : Mendoza	AREA : Zona Norte
<b>CURVAS DE IGUAL CONDUCTIVIDAD ELECTRICA</b>	
Segundo nivel de explotación - (Prof-100-180m)	
ELABORO : Ing. A. Alvarez	REVISION :
UNIDAD : Hidroquímica	LAMINA
FECHA : 05/93	2





**REFERENCIAS :**

5500 micromho/cm  
 Curva de igual conductividad  
 eléctrica específica a 25 C.  
 PERIODO DE MUESTREO 1991/92

**ESCALA GRAFICA**



**CENTRO REGIONAL DE AGUA SUBTERRANEA**  
 San Juan - República Argentina

PROVINCIA : Mendoza      AREA : Zona Norte

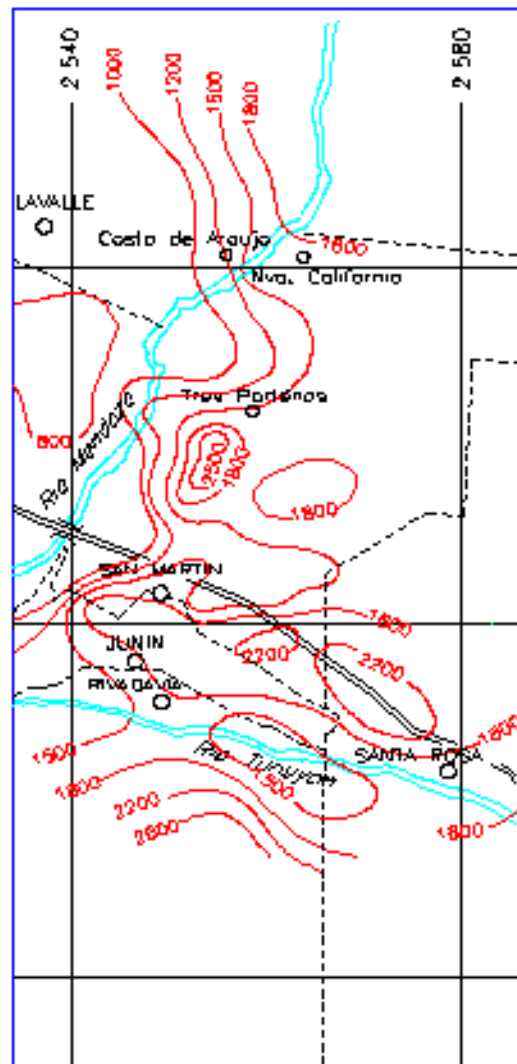
**CURVAS DE IGUAL CONDUCTIVIDAD ELECTRICA**  
 Tercer nivel de explotación - (Prof. > 200m)

ELABORO : Ing. A. Alvarez	REVISION :	LAMINA
UNIDAD : Hidroquímica		3
FECHA : 05/93		

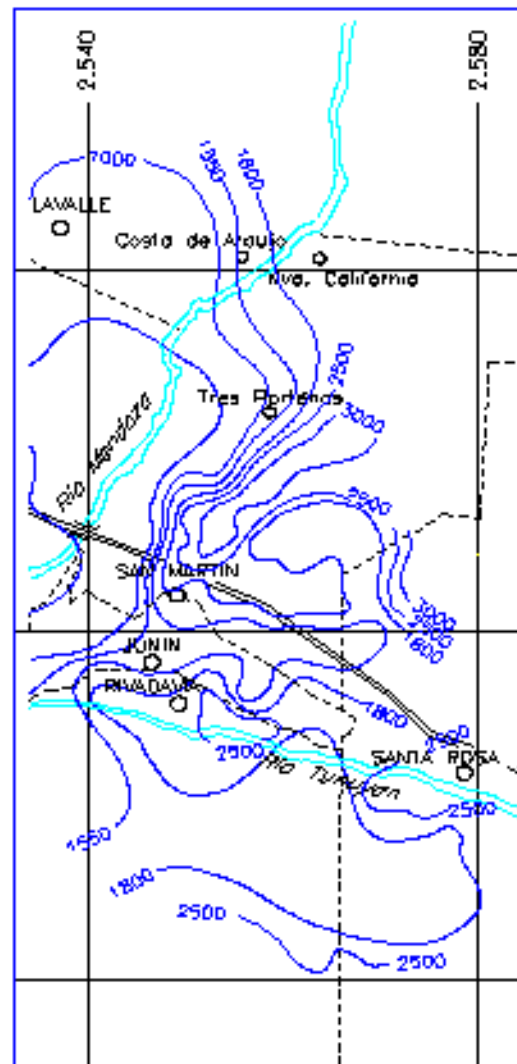
# CURVAS DE ISOCONDUCTIVIDAD ELECTRICA II NIVEL

CUENCA NORTE - AREA CENTRAL

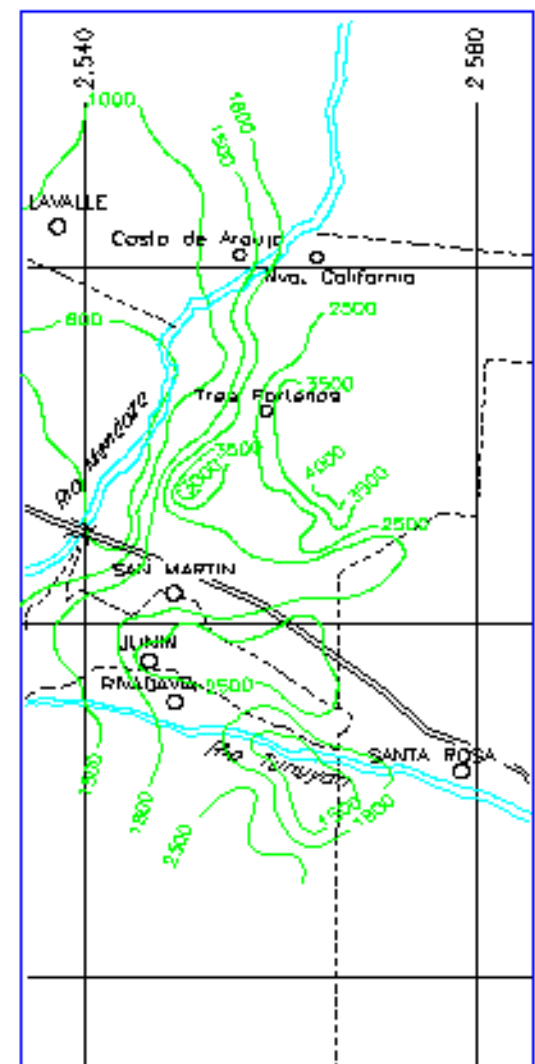
AÑO 1979/83



AÑO 1987



AÑO 1991

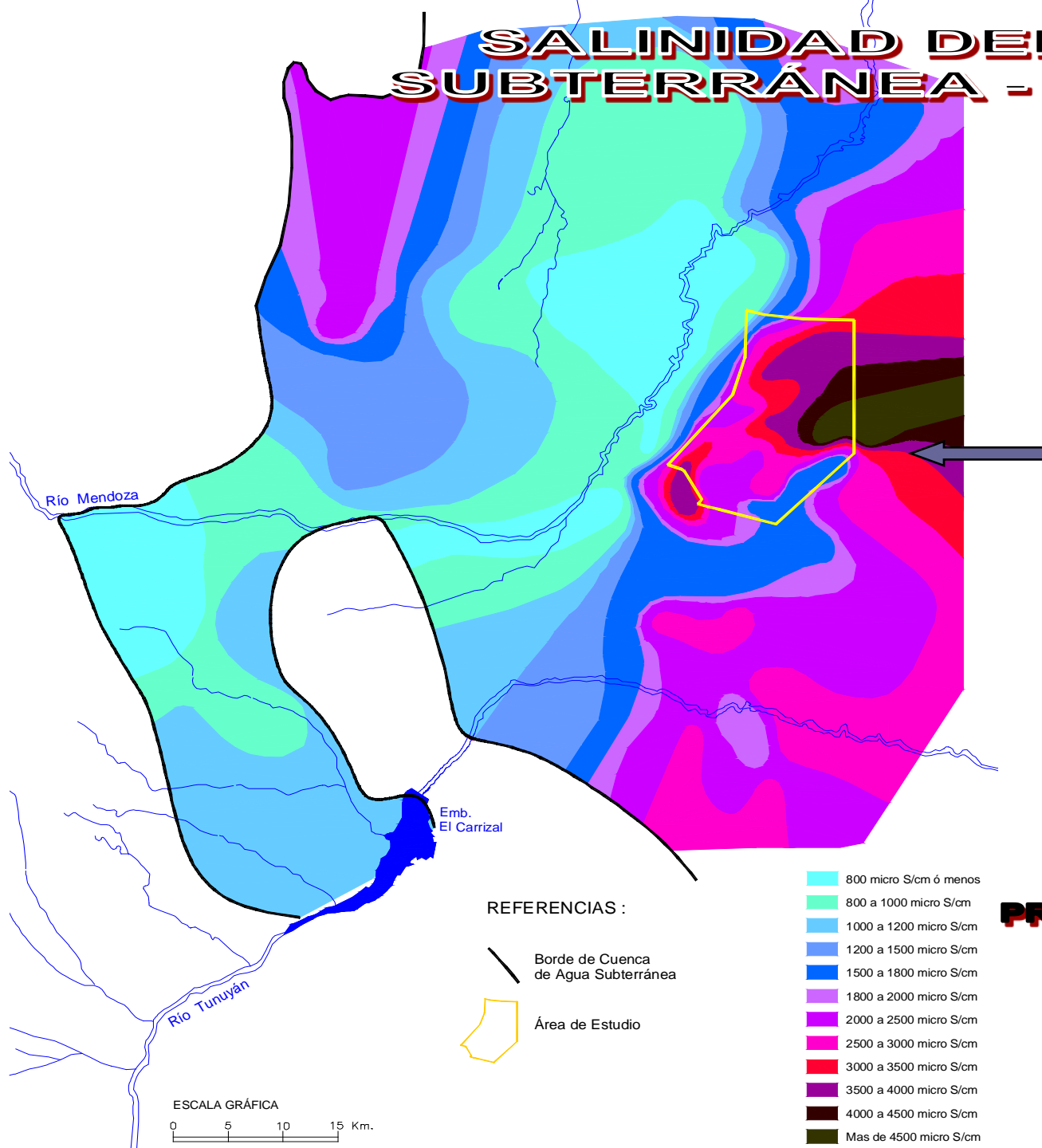


Fuente: Amílcar Álvarez, INA CRA

Lamina N 5



# SALINIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA - AÑO 2002



**AREA DE ESTUDIO**

**PROFUNDIDAD DE EXPLOTACIÓN**

**100 a 130 m**

REFERENCIAS :

— Borde de Cuenca de Agua Subterránea

▭ Área de Estudio

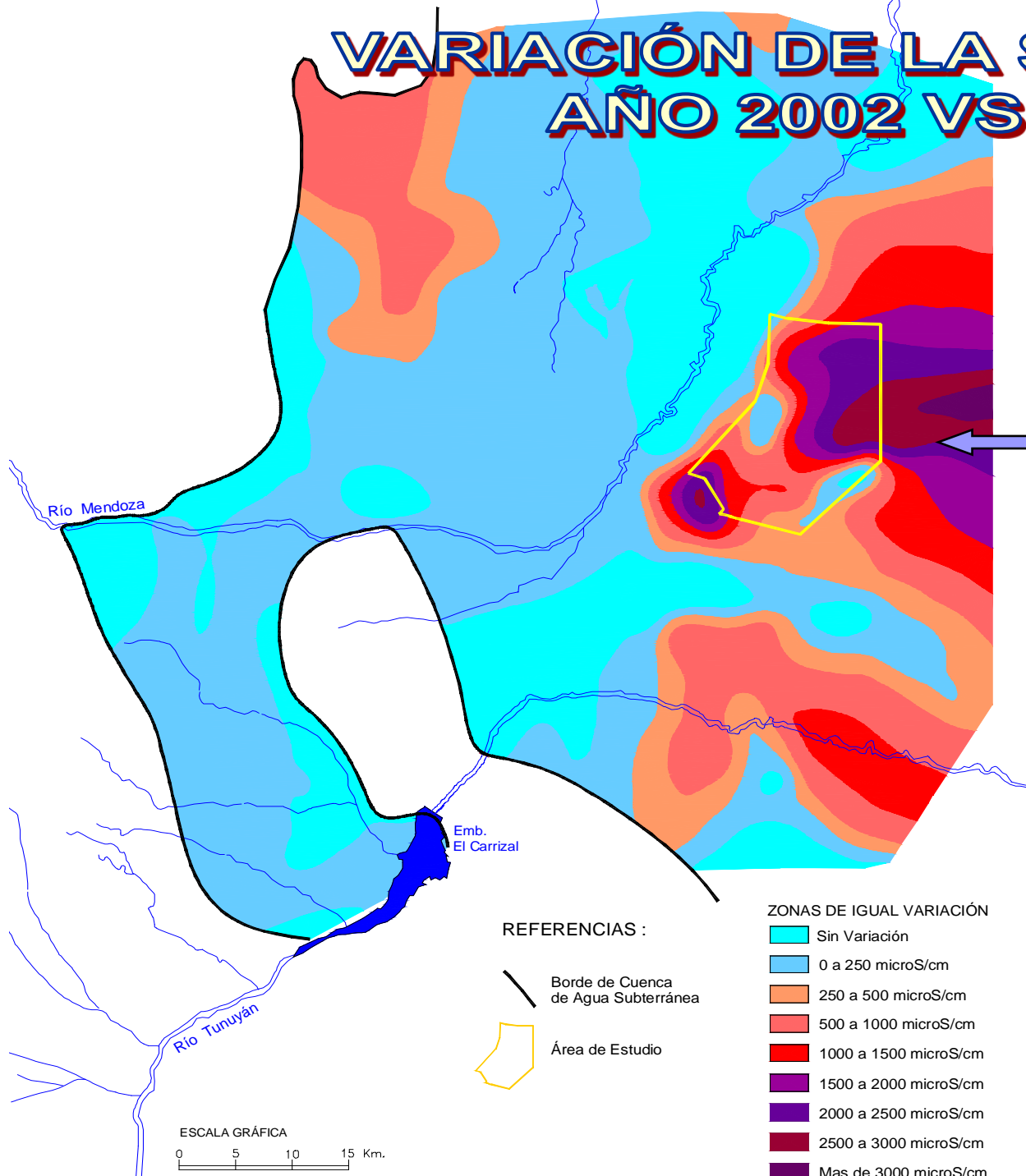
- 800 micro S/cm ó menos
- 800 a 1000 micro S/cm
- 1000 a 1200 micro S/cm
- 1200 a 1500 micro S/cm
- 1500 a 1800 micro S/cm
- 1800 a 2000 micro S/cm
- 2000 a 2500 micro S/cm
- 2500 a 3000 micro S/cm
- 3000 a 3500 micro S/cm
- 3500 a 4000 micro S/cm
- 4000 a 4500 micro S/cm
- Mas de 4500 micro S/cm

ESCALA GRÁFICA

0 5 10 15 Km.

Fuente: Amílcar Álvarez, INA CRA

# VARIACIÓN DE LA SALINIDAD AÑO 2002 VS. 1979

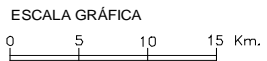


**ÁREA DE ESTUDIO**

### REFERENCIAS :

### ZONAS DE IGUAL VARIACIÓN

- Sin Variación
- 0 a 250 microS/cm
- 250 a 500 microS/cm
- 500 a 1000 microS/cm
- 1000 a 1500 microS/cm
- 1500 a 2000 microS/cm
- 2000 a 2500 microS/cm
- 2500 a 3000 microS/cm
- Mas de 3000 microS/cm



**PROFUNDIDAD DE EXPLOTACIÓN**

**100 a 180 m**

Fuente: Amílcar Álvarez, INA CRA

# TOTAL

✓ 23.018,99 ha

✓ 1.191 Propiedades

✓ Superficie cultivada 12.451,85 ha

✓ Con derecho de riego 9.813,82 ha

✓ Con riego por pozo exclusivo 2.638,03 ha

✓ con riego presurizado 436,5 ha

✓ 1.010 Pozos censados

↳ 26 % ensayados (262)

↳ 48 % en mal estado

↳ 18 % cegados

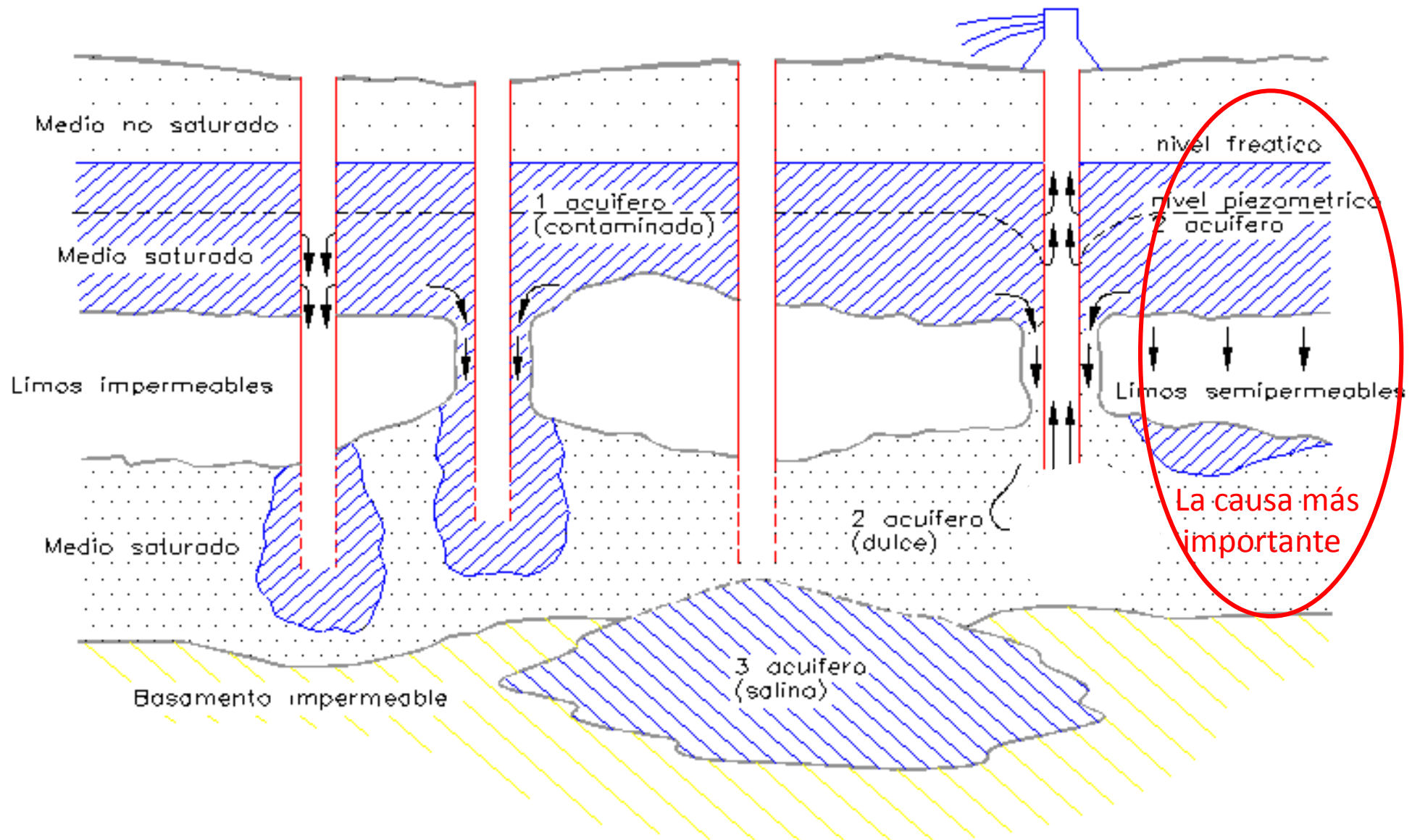
↳ 11 % sin equipar

↳ 5 % sin motor

↳ 1 % sin bomba

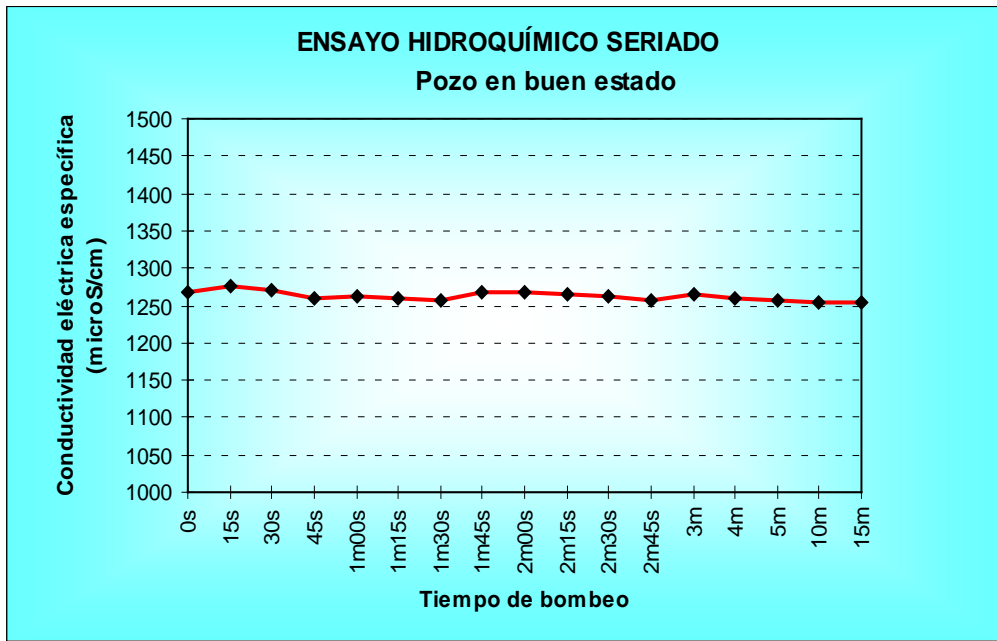
↳ 35 % medibles nivel estático

# CONTAMINACION DE UN ACUIFERO PROFUNDO POR EFECTO DE UNO SUPERIOR DE MAYOR POTENCIAL HIDRAULICO

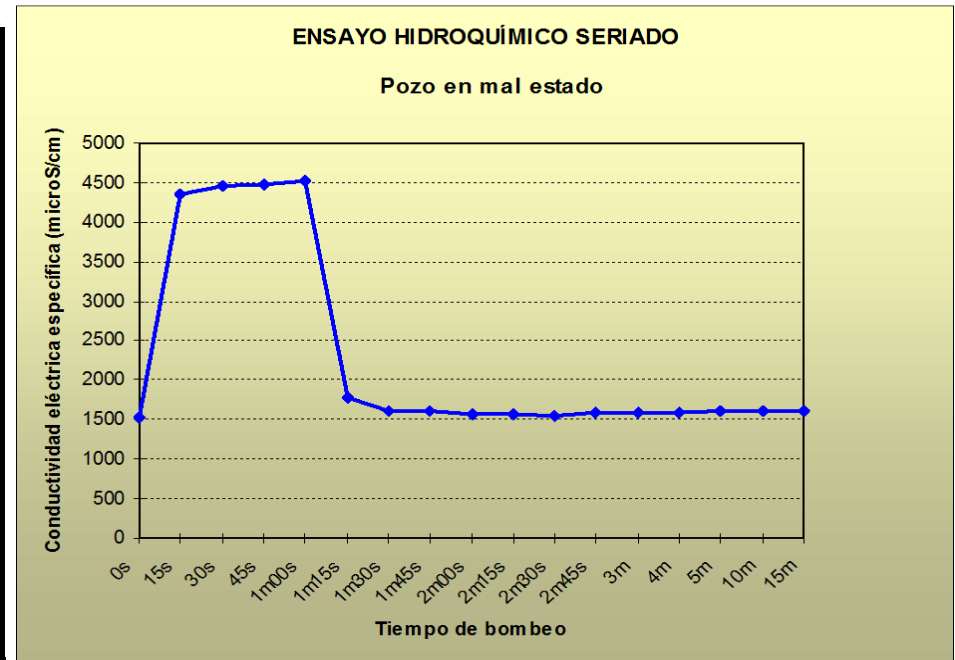


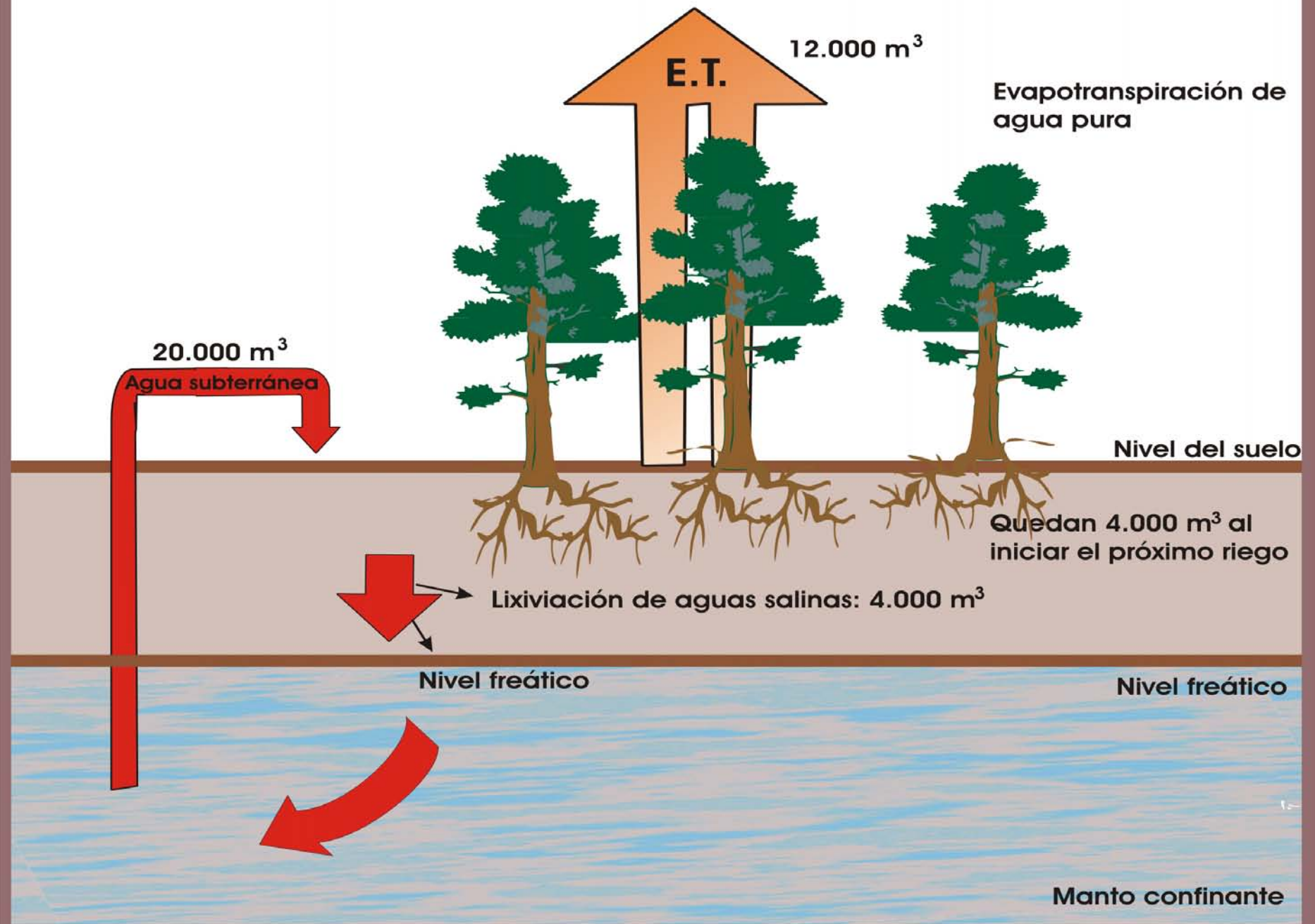
# Ensayo seriado

## a. Pozo sin problemas



## b. Pozo roto

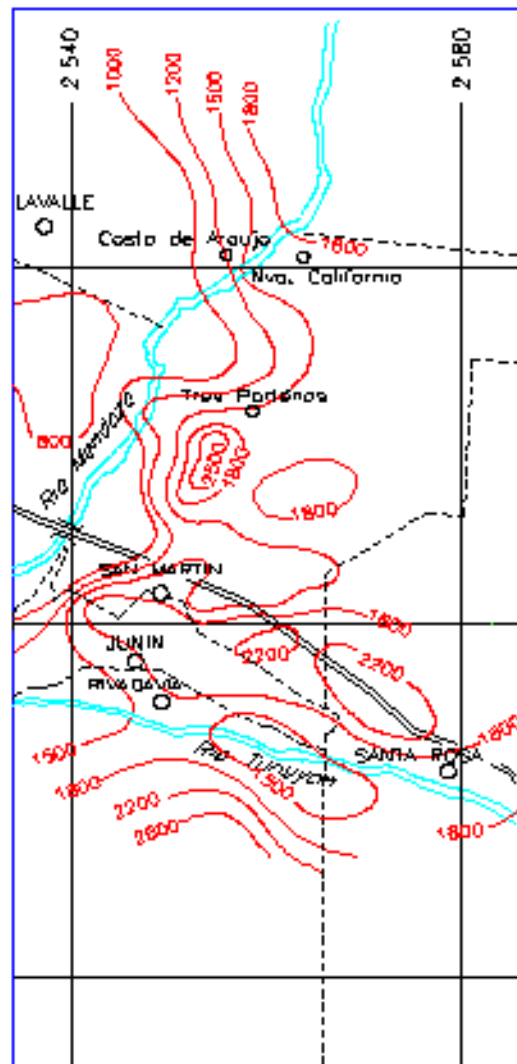




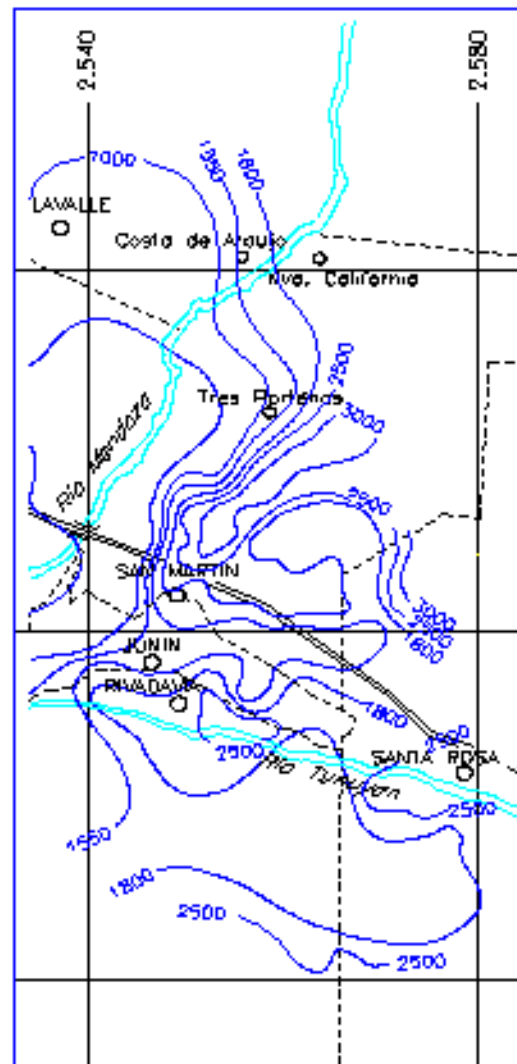
# CURVAS DE ISOCONDUCTIVIDAD ELECTRICA II NIVEL

CUENCA NORTE - AREA CENTRAL

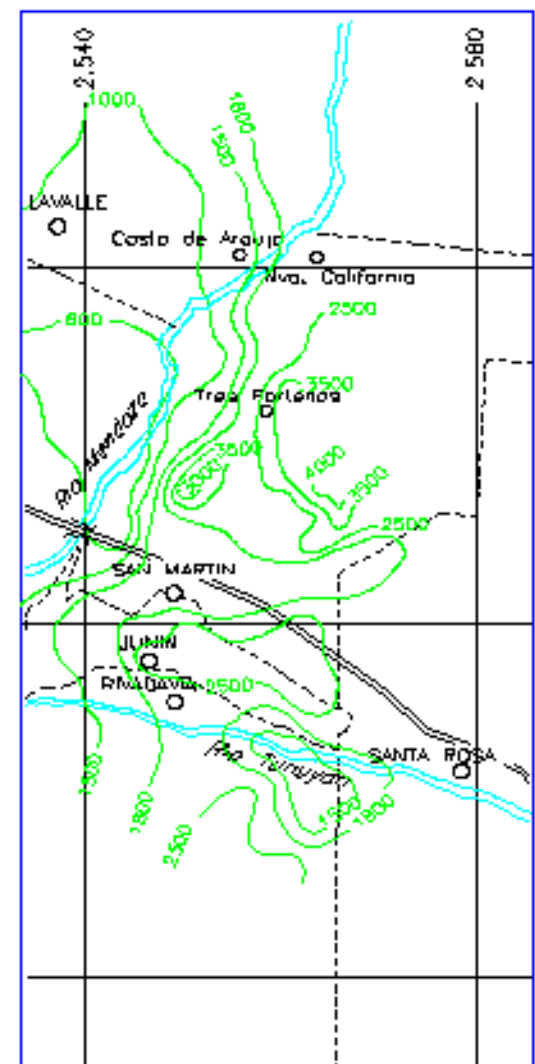
AÑO 1979/83



AÑO 1987



AÑO 1991



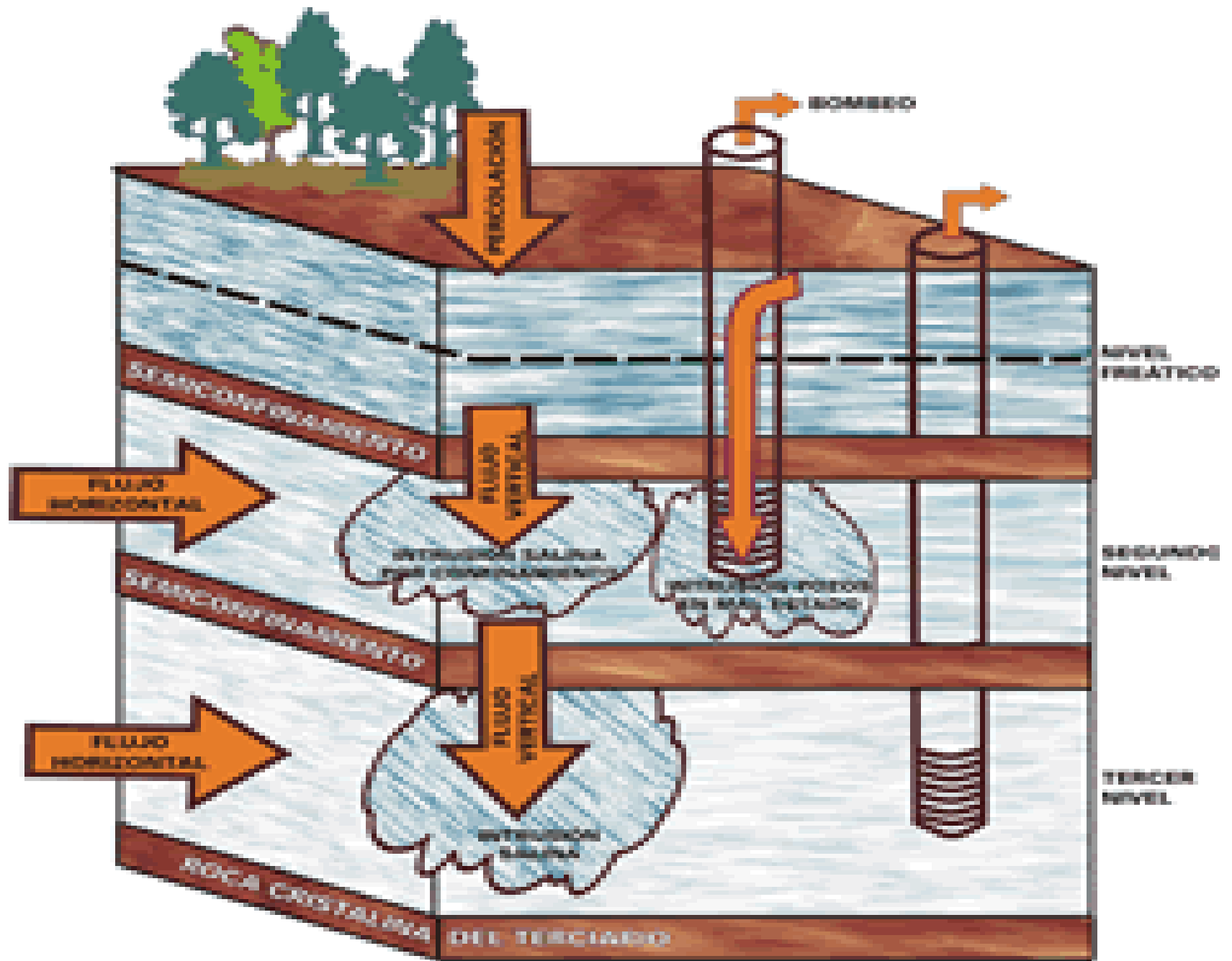
Fuente: Amílcar Álvarez, INA CRA

Lamina N 5

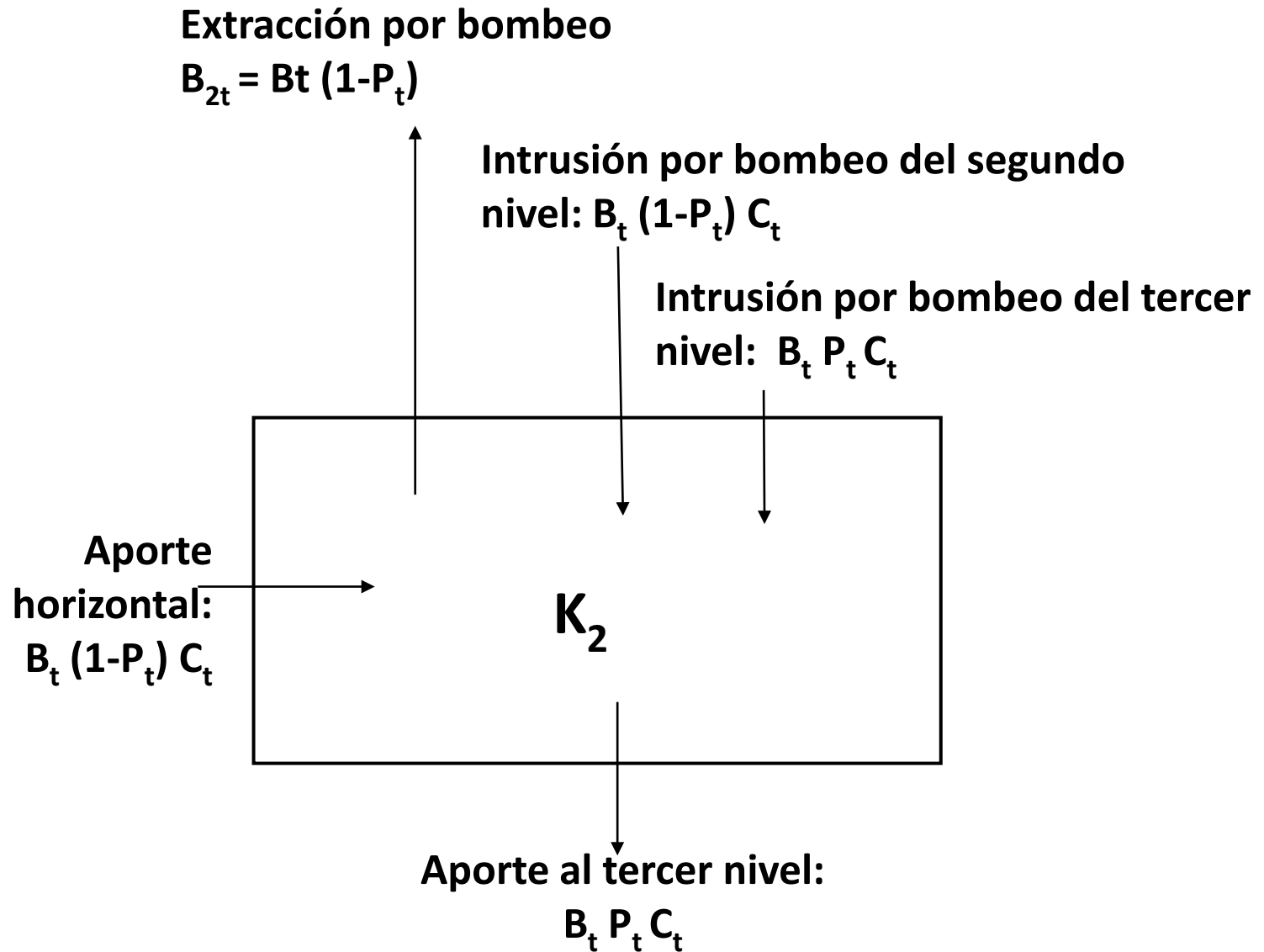
Modelo de Simulación. Origen de la salinización. Corrida Básica

Variable	Periodo	Salinidad del acuífero Medio
Proporción de intrusión freática	0,698 <sup>0</sup>	1673
C. E. Inicial en el nivel medio	1672,5	1953
C. E. del aporte horizontal	1300	2191
C. E. del nivel freático	4500	2393
C. E. del nivel medio en el año 10	3170	2565
C. E. del nivel medio en el largo plazo	3534	2711
Has. regadas por pozo	30	2835
Extracción por Pozo (hm <sup>3</sup> /año)	0,3	2940
Superficie del area estudiada (hm <sup>2</sup> )	14000	3030
Espesor del acuífero (hm)	0,8	3105
Coefficiente de Almacenamiento	0,05	3170
Vol·men de agua en el acuífero medio	560	3225
Cantidad de pozos con fines de riego	281	3271
Extracciones por año (hm <sup>3</sup> )	84,36	3311
N·mero de pozos deteriorados	168	3344
Volumen de Intrusión	59	3373
Caudal Requerido por Bomba. (m <sup>3</sup> /día)	2702	3397
Caudal Requerido por Bomba. (m <sup>3</sup> /hora)	183	3418
Caudal Requerido por Bomba. (lts./seg.)	82	3435

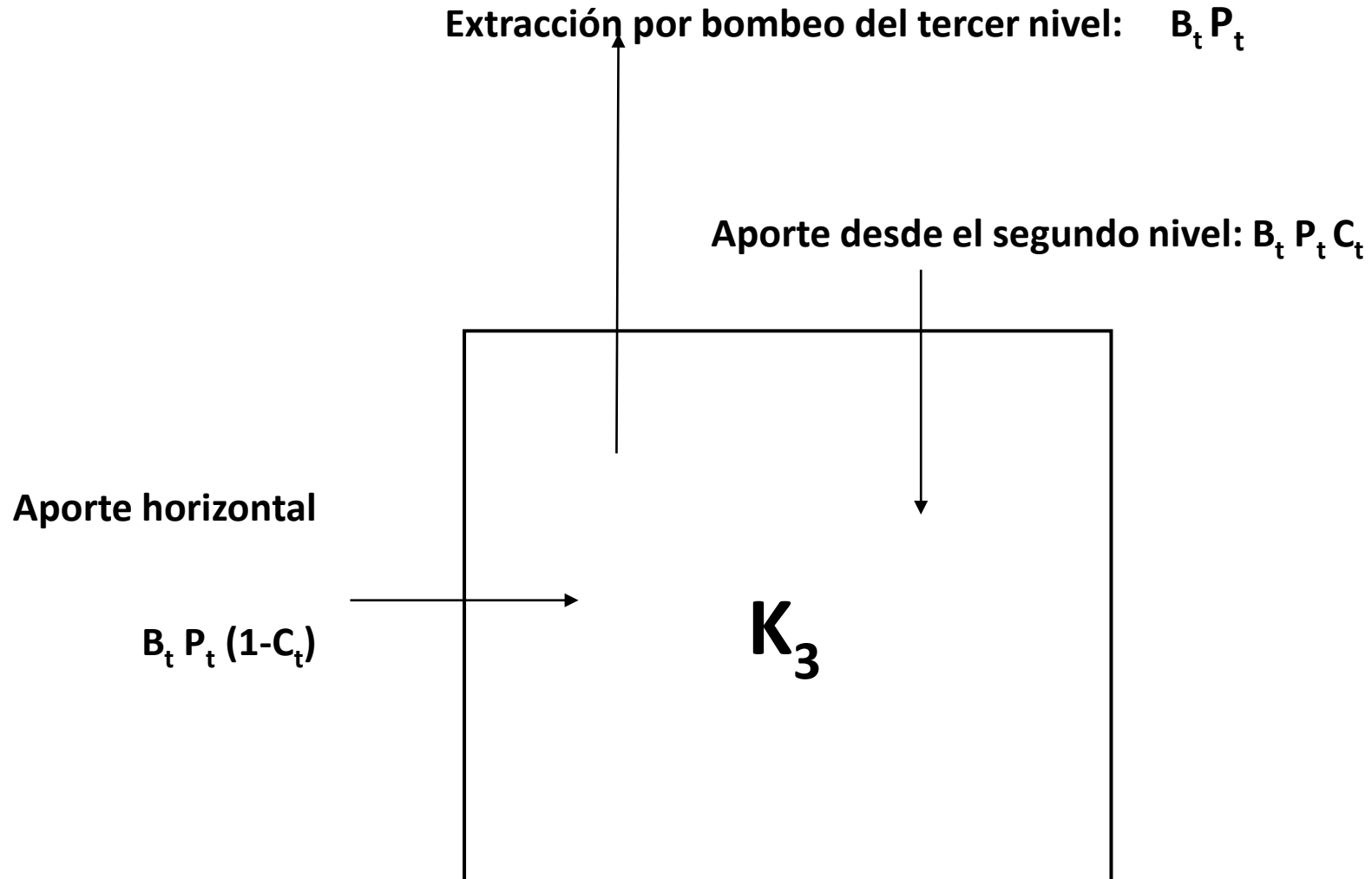




## Esquema del flujo para el segundo nivel



# Esquema del flujo para el tercer nivel



**Trayectoria de la salinidad en el nivel 3,  
se calcula por regla de mezcla.**

$$S_{3t} = (S_{3,t-1} K_3 - B_t P_t S_{3,t-1} + B_t P_t \alpha S_{2,t-1} + SH_{3,t-1} B_t (1 - \alpha) P_t) / K_3$$

$S_{it}$  la salinidad del nivel acuífero  $i$  en el año  $t$ , donde  $i$  es el nivel,  $i = 1, 2, 3$

$P_t$  la proporción de agua extraída desde el tercer nivel,  $(1 - P_t)$  es el agua bombeada desde el segundo nivel.

$\alpha$  es la proporción de agua que ingresa al tercer nivel desde el segundo,  $(1 - \alpha)$  es la proporción de agua que ingresa como aporte horizontal..

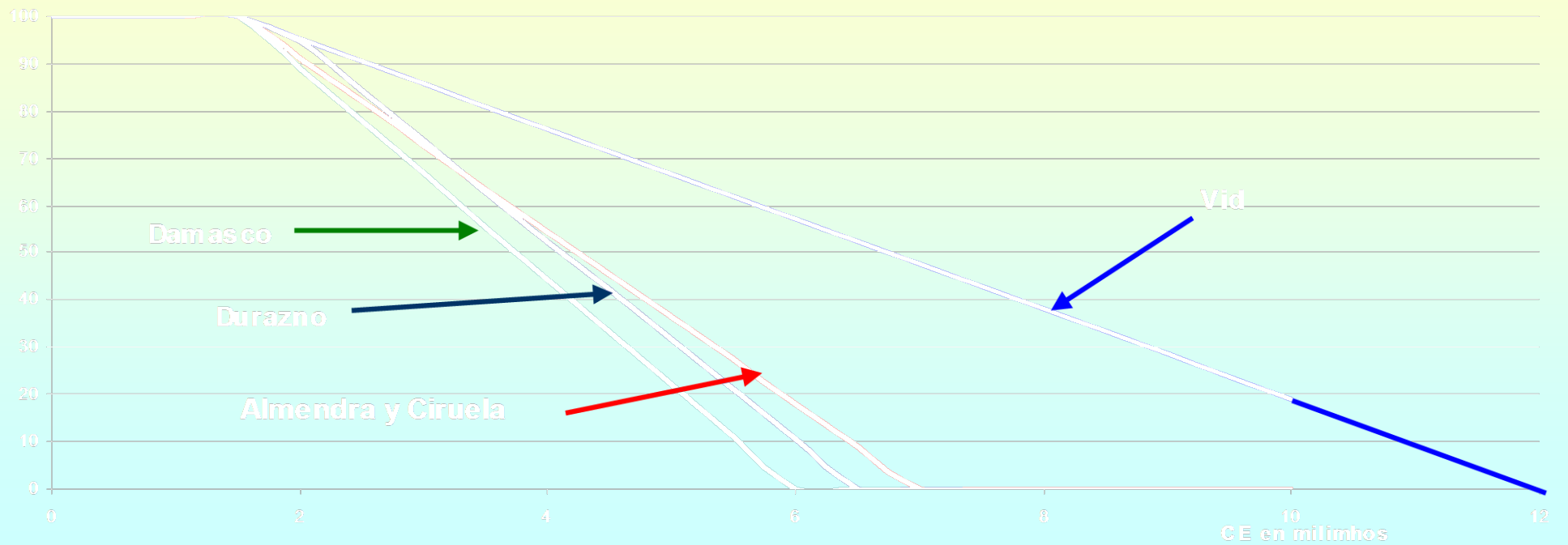
$B_t$  es el volumen total bombeado en el año  $t$

$B_{it}$  es el volumen extraído por bombeo del nivel  $i$ ;  $i = 2, 3$

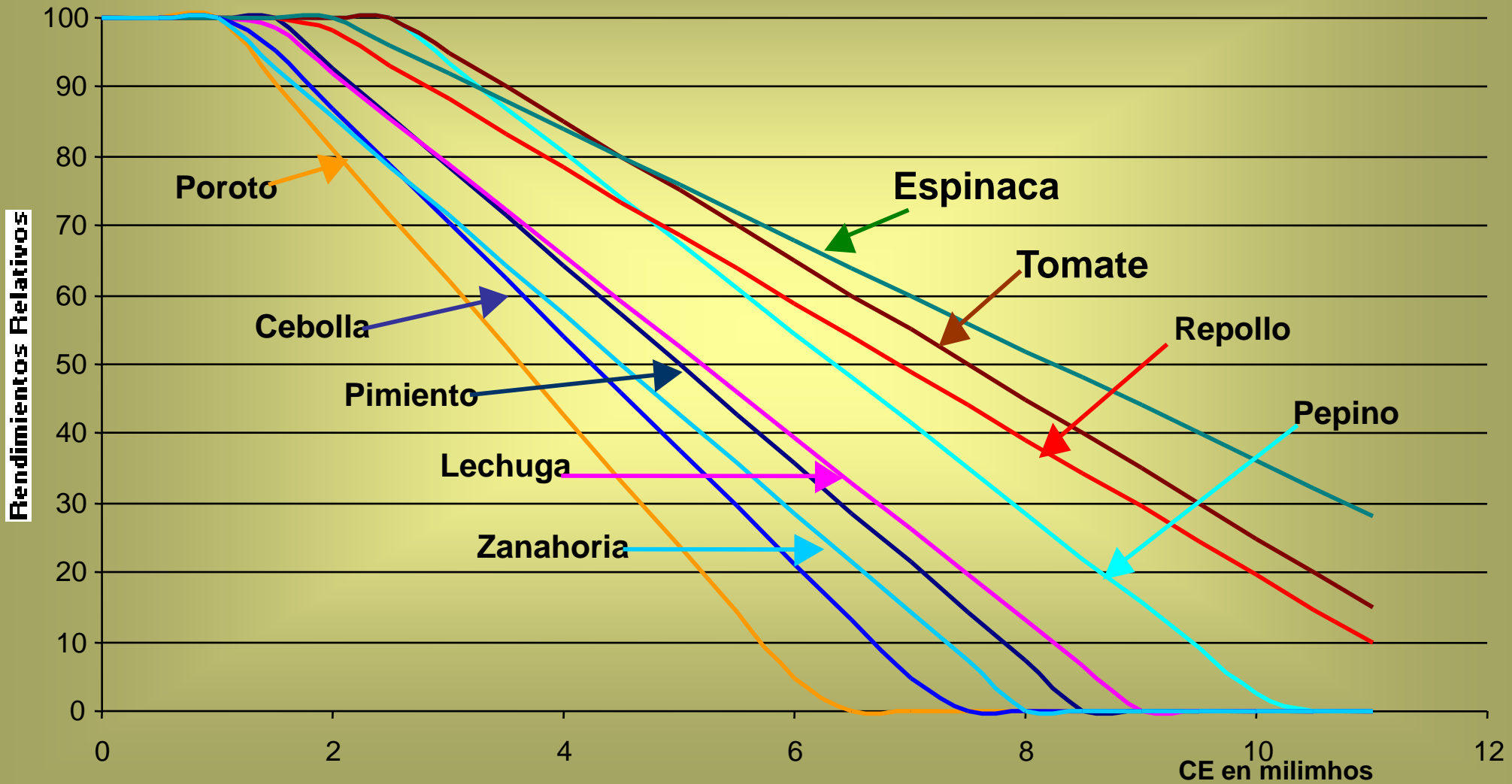
$K_{it}$  es el stock de agua subterránea existente en el nivel  $i$ ,  $i = 2, 3$ . Se entiende para todos los fines prácticos que  $K_{2t}$  y  $K_{3t}$  son constantes en el tiempo.

$SH_{it}$  es la salinidad del agua del nivel  $i$  ( $i = 2, 3$ ) que ingresa horizontalmente al área bajo estudio durante el período  $t$ .

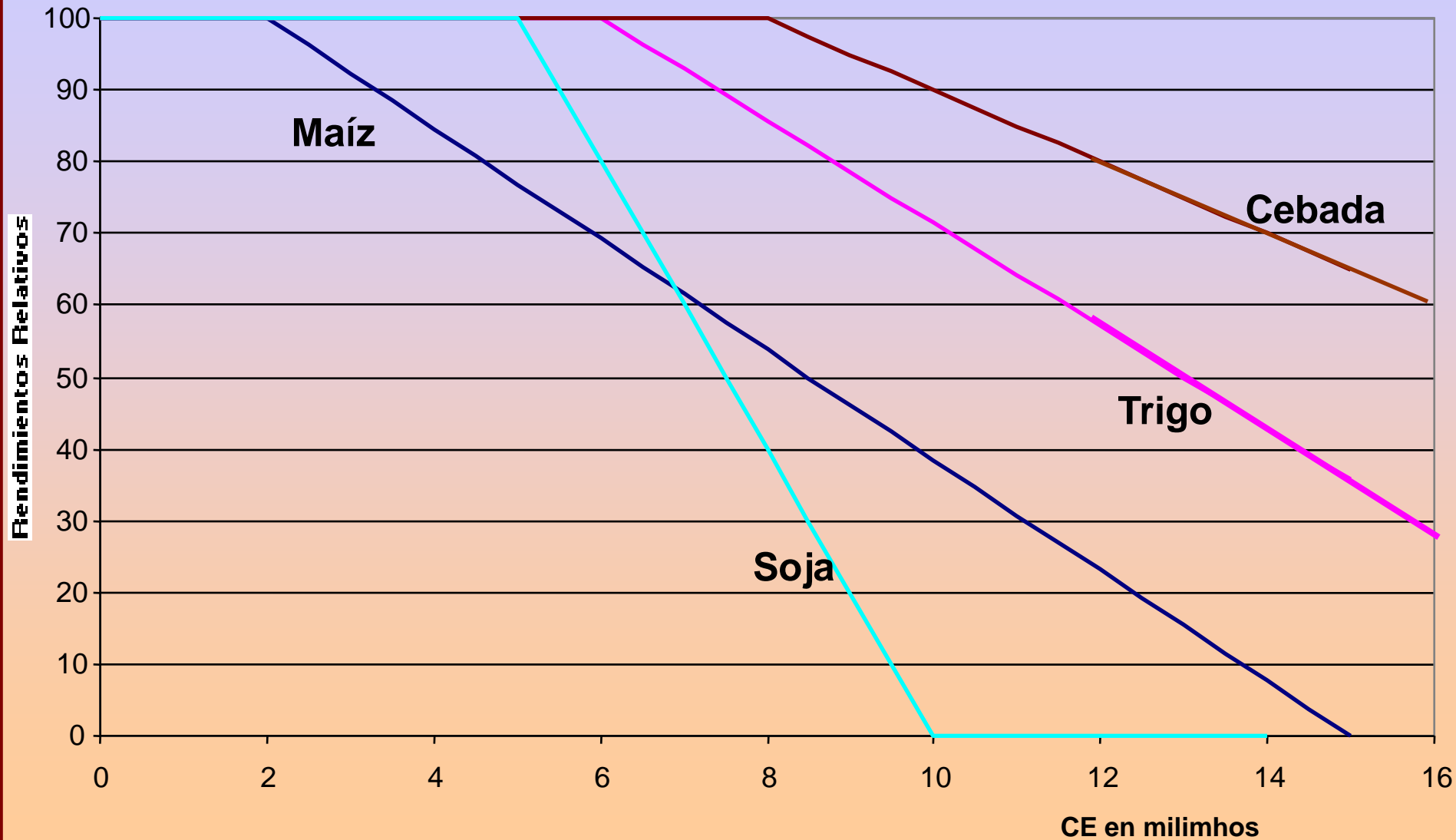
# RENDIMIENTOS EN FUNCION DE LA SALINIDAD DEL SUELO



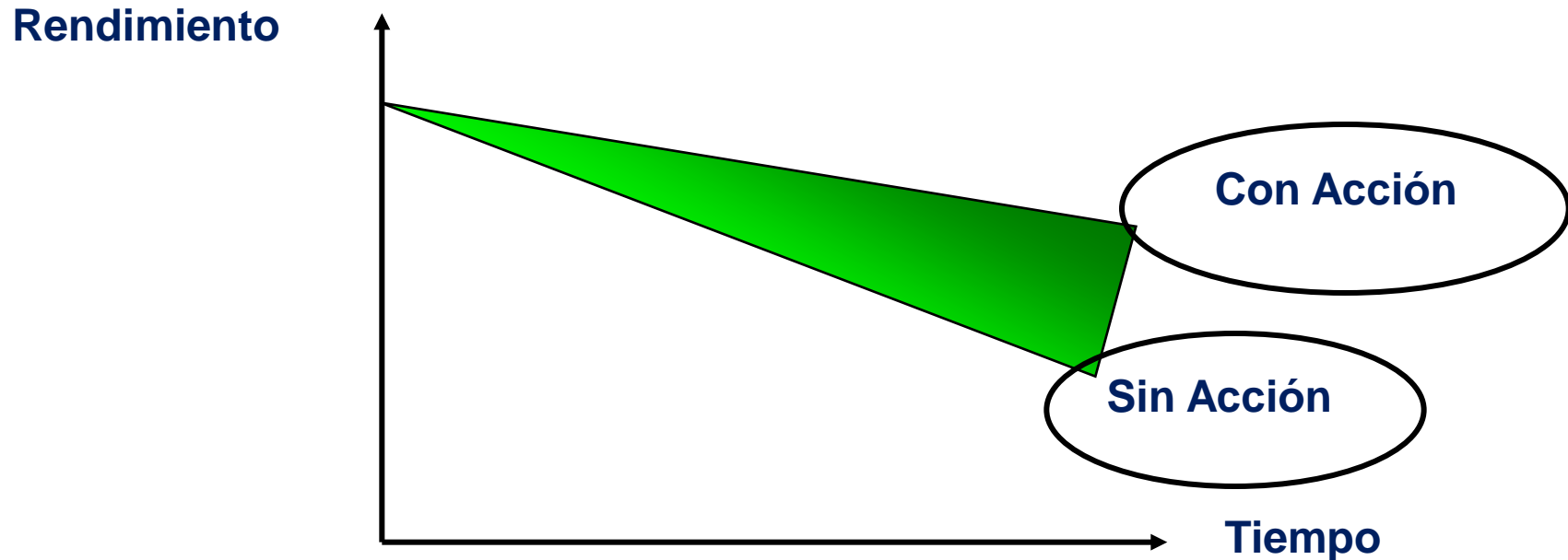
# RENDIMIENTOS EN FUNCION DE LA SALINIDAD DEL SUELO



# RENDIMIENTOS EN FUNCION DE LA SALINIDAD DEL SUELO



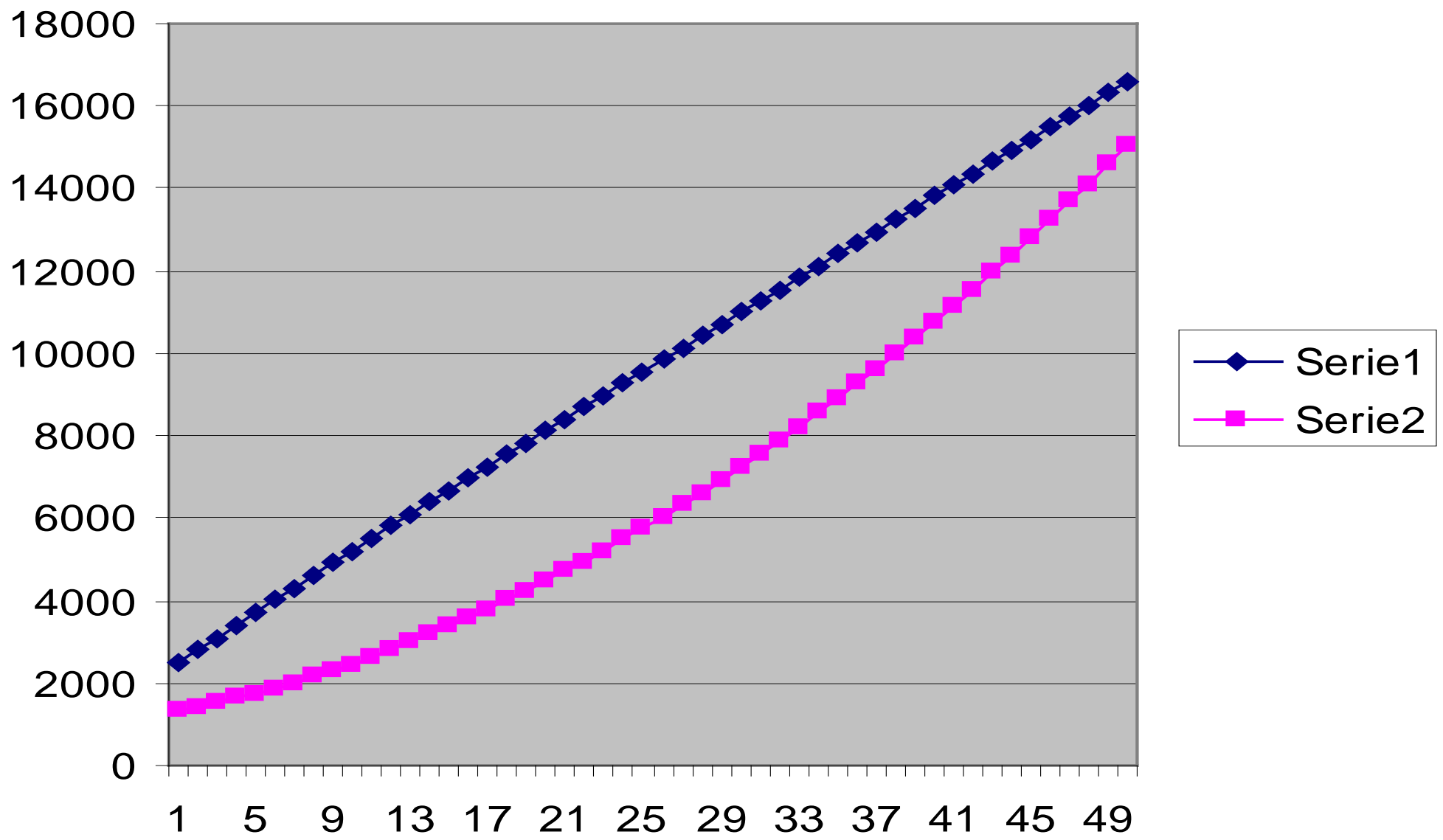
# EFECTO DEL DETERIORO DE LA CALIDAD DEL AGUA SOBRE LOS CULTIVOS



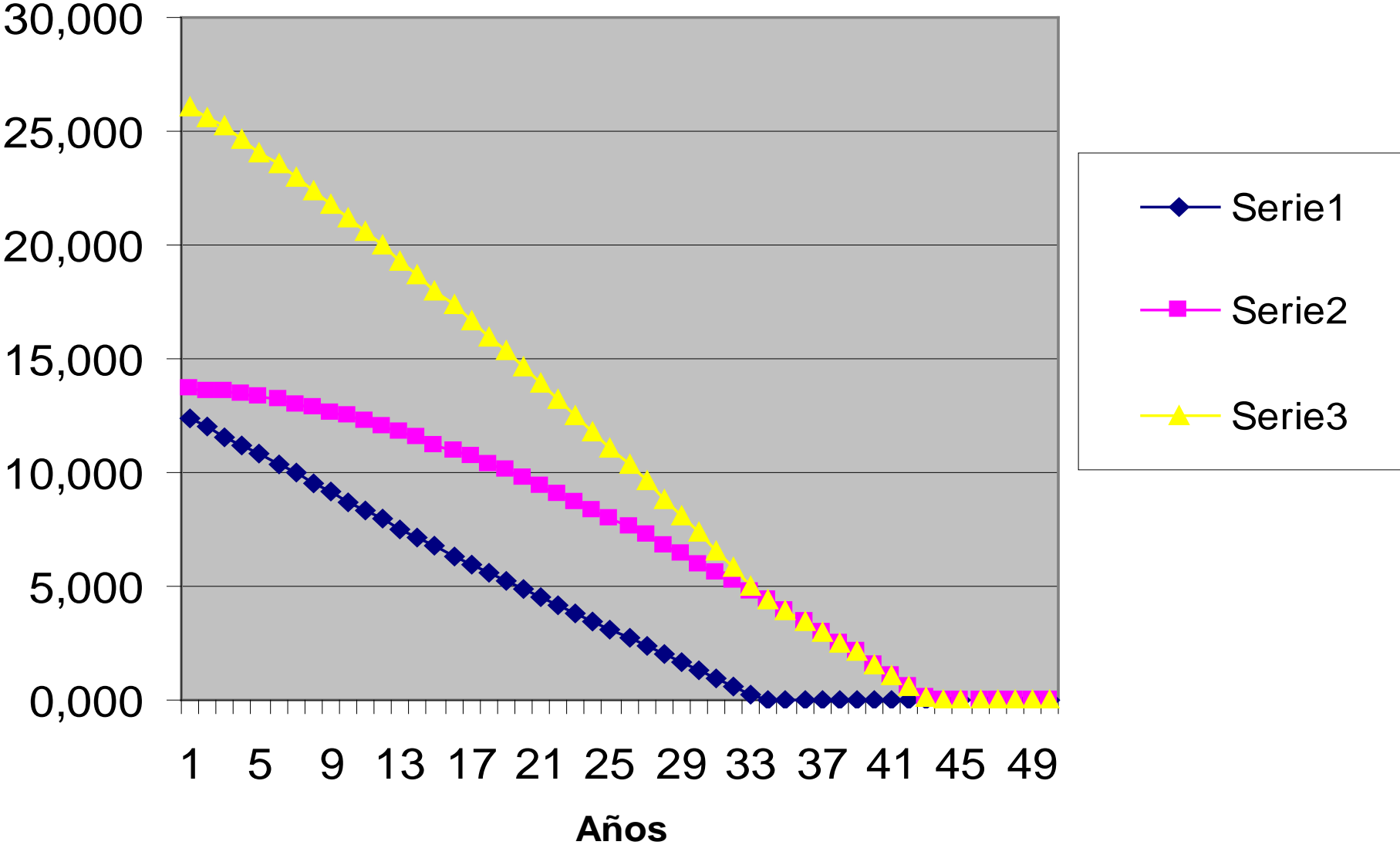
- En el momento 0 se supone que los rendimientos (producción por ha) se encuentran en el punto R.
- Si no se hace nada (sin proyecto) los rendimientos seguirán una trayectoria temporal como la indicada. Si se realiza una acción determinada, los rendimientos caerán más lentamente en el tiempo, como indica la línea denominada “con acción”.
- Las distancias entre ambas líneas indican los rendimientos que se dejan de perder (se ganan) al establecer la acción.

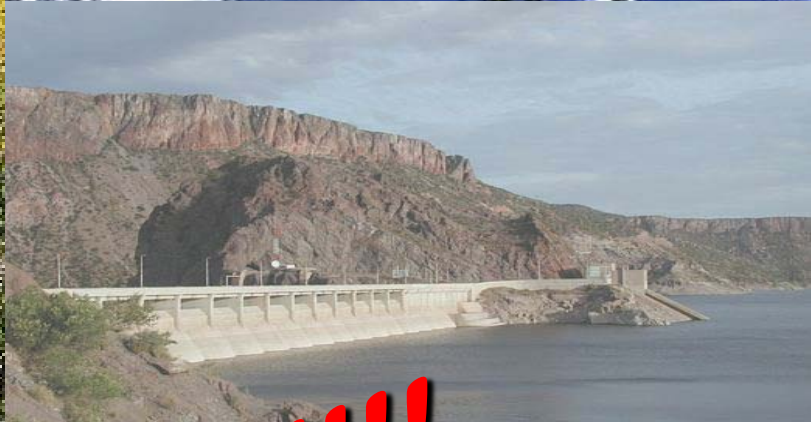
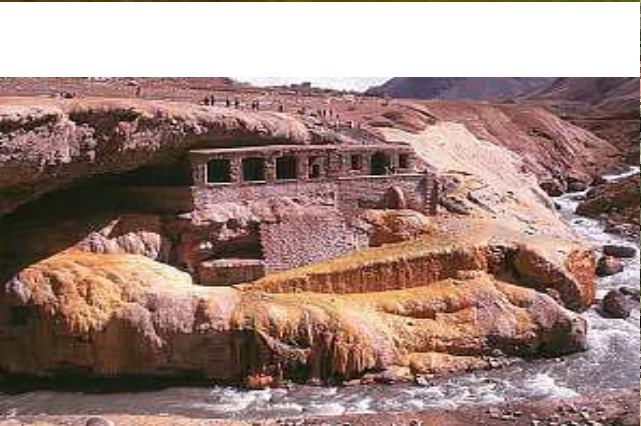


# Salinidad suelo



# Ingresos Totales del Area (1.000\$)



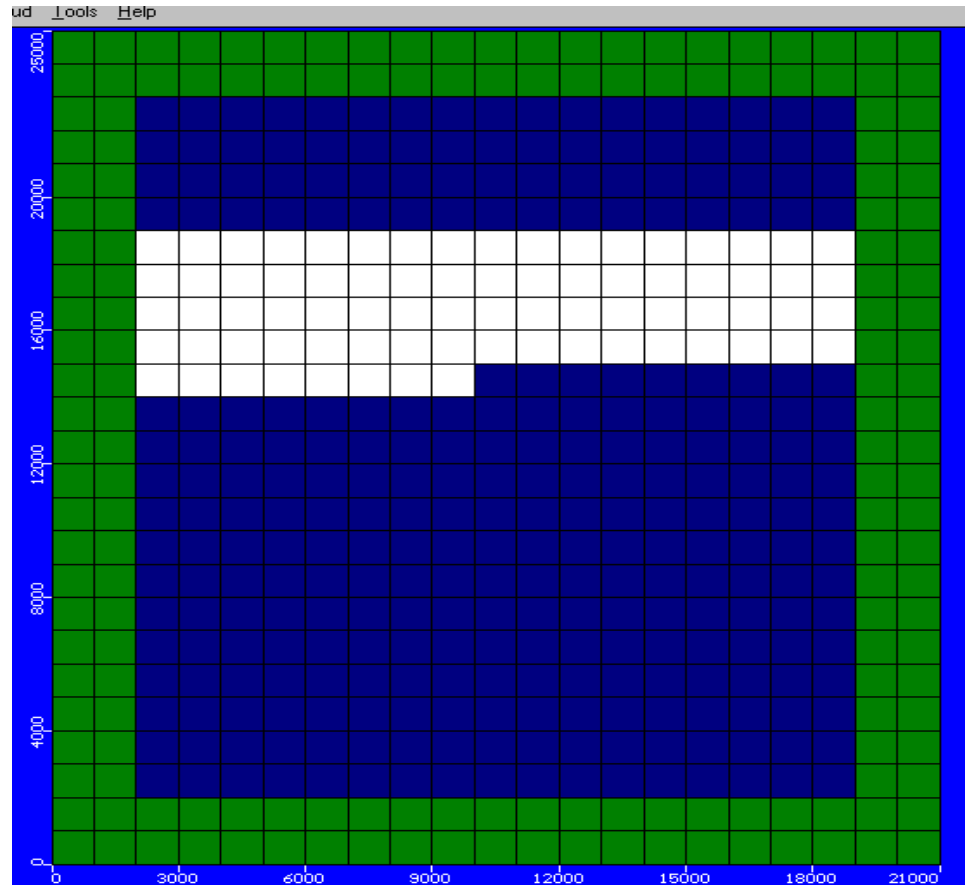


**Gracias por la paciencia !!!!**



# MODELO DE VICTORIA Y ALVAREZ

**ESTUDIO DEL PROCESO DE SALINIZACION DE  
ACUIFEROS EN LA ZONA ESTE DEL OASIS NORTE  
ZONA DE RIEGO CON AGUA SUBTERRANEA  
ZONA DE RIEGO CON AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRANEA**

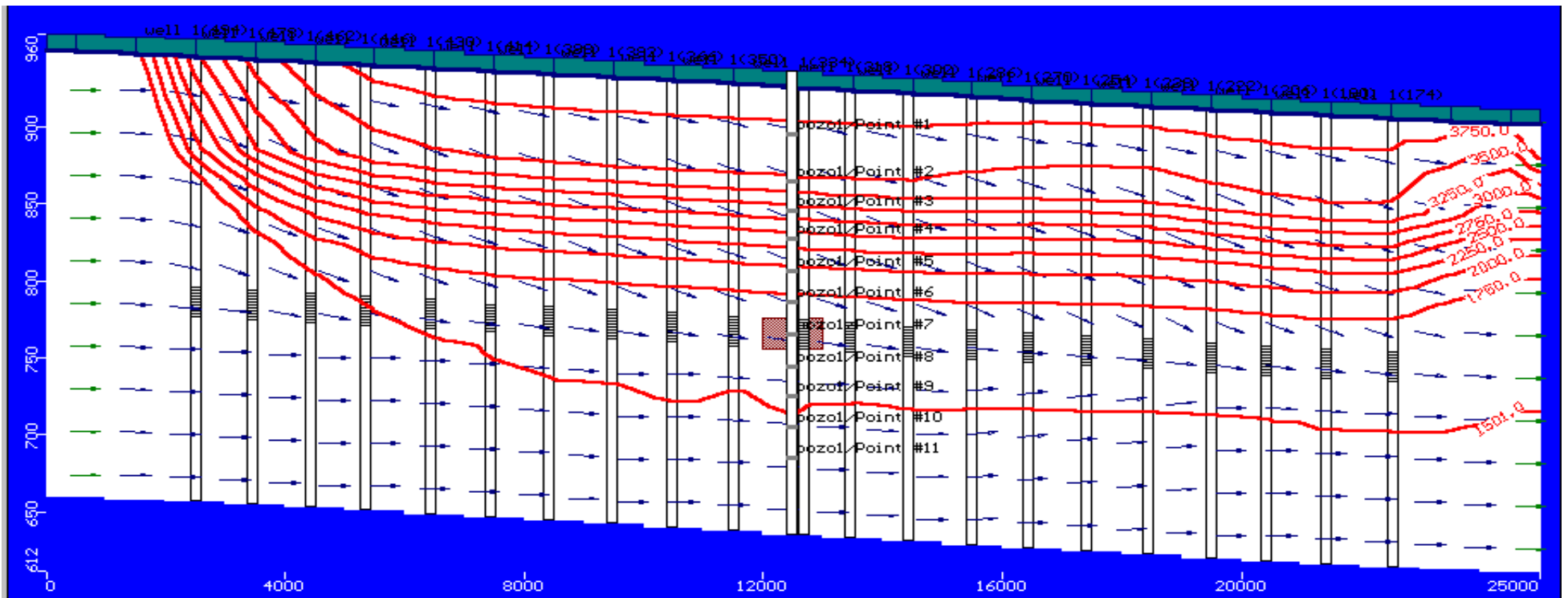


**RIEGO CON AGUA SUBTERRANEA**

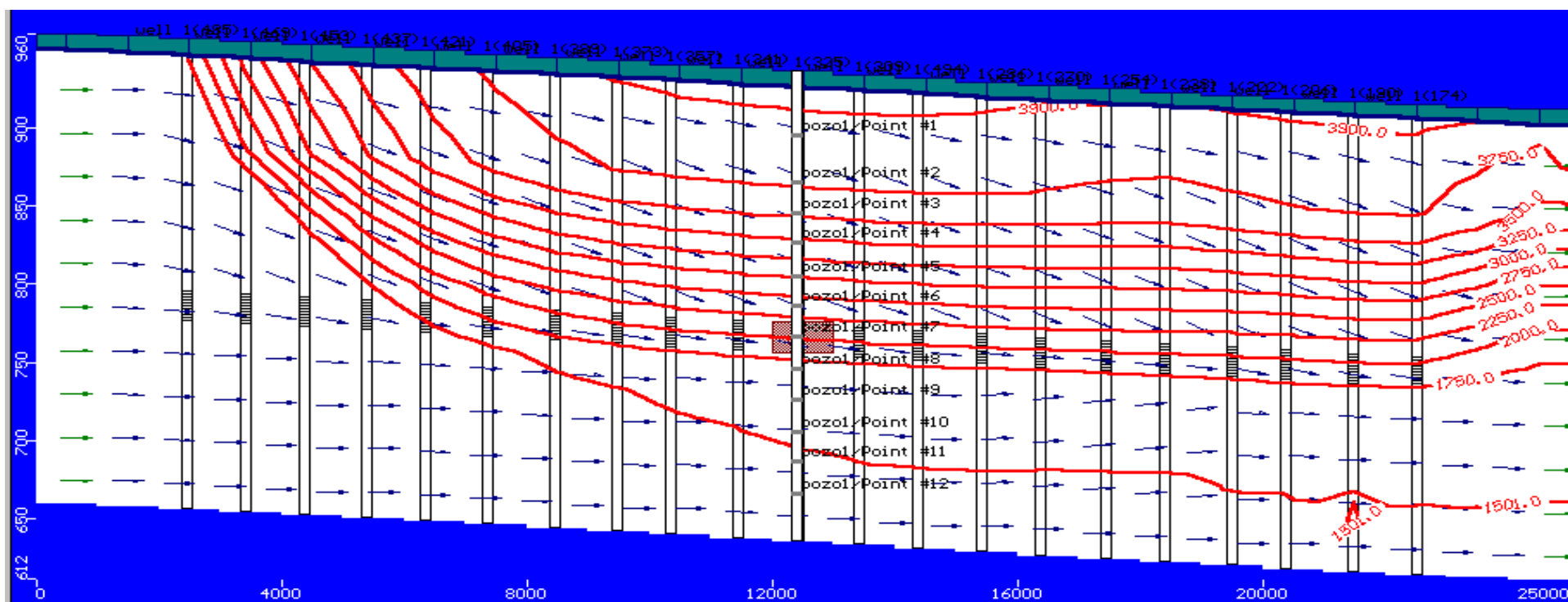


**RIEGO CON AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRANEA**

**ESTUDIO DEL PROCESO DE SALINIZACION DE  
ACUIFEROS EN LA ZONA ESTE DEL OASIS NORTE  
CURVAS DE SALINIDAD Y VECTORES DE FLUJO  
CORTE C-C  
20 AÑOS DE SIMULACIÓN**



**ESTUDIO DEL PROCESO DE SALINIZACION DE  
ACUIFEROS EN LA ZONA ESTE DEL OASIS NORTE  
CURVAS DE SALINIDAD Y VECTORES DE FLUJO  
CORTE C-C  
40 AÑOS DE SIMULACIÓN**



## CONCLUSIONES

- ✓ **La salinización de acuíferos por movimiento vertical de aguas salinas, es irreversible y continuará en el transcurso del tiempo.**
- ✓ **La cantidad de pozos con roturas es importante y se debe esperar que aumente. Esto deteriora simultáneamente la calidad del agua subterránea y la producción agrícola.**
- ✓ **La situación presente y sus perspectivas futuras, es un caso de “sobreexplotación” del recurso hídrico subterráneo.**
- ✓ **Estudiar la posibilidad de disponer de fuentes alternativas de agua.**



## RECOMENDACIONES

- ✓ **Mejorar la eficiencia en el uso general del agua.**
- ✓ **Mantener el criterio de cegar pozos en mal estado.**
- ✓ **.Aplicar la reglamentación de construcción de pozos.**
- ✓ **Ampliar la red de frentímetros para obtener información hidrológica e hidroquímica.**
- ✓ **Realizar muestreos hidroquímicos y mediciones hidro-lógicas periódicas para su seguimiento.**
- ✓ **Operar modelos de simulación para alternativas de uso conjunto de agua superficial y subterránea.**

# MODELO 2