

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
XI CONGRESO CHILEÑO

ESTUDIO DEL EFECTO DE ALGUNOS AFLUENTES AL RIO LLUTA EN LA
CALIDAD QUIMICA DE SUS AGUAS DE RIEGO

EMILIO IRAGÜEN I. (1)

CARLO CARVALLO A. (2)

RESUMEN

Desde hace varios años la Dirección de Riego ha venido estudiando los inconvenientes que derivan de la salinidad de las aguas del río LLuta ya que deriva de ello un desmedro de la situación agrícola en general, y consecuentemente, una incidencia negativa en el aspecto social. Por lo anterior, INGENDESA abordó, entre otros estudios, la Cuantificación de Agentes Contaminantes del río LLuta, para lo cual se desarrolló un modelo que permitiera estudiar el efecto que algunos afluentes del río tienen sobre las aguas que llegan a la zona de riego. Esto con el objeto de definir acciones sobre tales afluentes que permitan mejorar la calidad de ellas.

El presente trabajo tiene por objeto mostrar la concepción y calibración del modelo antes mencionado, además de presentar el resultado de simular algunos casos posibles de llevar a la práctica.

-
- (1) Ingeniero Civil U de Chile. Jefe de Proyectos INGENDESA.
(2) Ingeniero Civil U de Chile. Ingeniero de Proyectos INGENDESA.

1.- INTRODUCCION

La cuenca del río LLuta (figura 1) está teniendo una incidencia cada vez más importante en la zona limítrofe norte del país, específicamente en la ciudad de Arica y sus alrededores. En efecto, las características salinas de las aguas del río están provocando un proceso progresivo de salinización de los suelos bajo riego con el consiguiente daño social. Las soluciones que se han estudiado a este problema pasan por la purificación de las aguas mediante procesos industriales tecnificados y de costo relativamente alto, alternativamente, establecer una infraestructura de riego (drenes y embalse) que permitiría estabilizar el proceso de salinización en sus niveles actuales o algo menores, también el desvío de cauces afluentes contaminantes del LLuta, o en su defecto, captar aguas de buena calidad y dejar las peores en su cauce natural para que lleguen al mar como hasta ahora. Si se considera que la superficie de regadío, por lo reducido de su extensión, no soporta por sí sola la economía asociada a un embalse, se ha pensado en compartir los costos de una obra de este tipo con la generación hidroeléctrica del recurso antes del uso consuntivo a que está destinado.

Todo lo anterior ha impulsado a la Dirección de Riego del MOP a estudiar la factibilidad económica de una presa en la cabecera del área de riego, analizar las características específicas del sector agrícola, investigar las características físico-químicas de las aguas de la cuenca y simular los efectos que tendrían acciones, tales como el desvío de cauces contaminantes, en la calidad de las aguas que se dispondría para el riego en la localidad de Tocontasi.

En este trabajo se presenta una metodología para modelar las características químicas del agua del río LLuta en algunos puntos de interés, además se muestran ejemplos de calibración del modelo y resultados de la simulación de algunas acciones que conducirían al mejoramiento de la calidad química de las aguas. Específicamente el modelo entrega las concentraciones de contaminantes y los caudales en algunos puntos del río LLuta cuando se alteran las condiciones en los puntos de entrada al cauce.

Con anterioridad el Ingeniero señor Luis Arrau del Canto y la Memorista de ingeniería civil de la U. de CH. señorita Silvia Sanchez F. habían planteado algunas formas de modelar la química del agua en la cuenca del río LLuta. La base conceptual de ambos estudios no difiere esencialmente ya que ambos aplican leyes de mezclas sin involucrar cambios de carácter químico propiamente tales, como por ejemplo, el intercambio iónico que probablemente está asociado a algunas aguas de la cuenca, como es el caso del río Azufre que tiene pH del orden de 1.5 mientras que a la altura de Tocontasi las aguas presentan un pH de 7.5 .

El modelo que se presenta en esta ocasión se gestó después de analizar la primera de las dos campañas de terreno que se realizaron con el objeto de detectar fuentes contaminantes en la cuenca. En ellas se contempló la toma de muestras de agua para análisis químicos junto a la medición de caudales, de conductividad, de temperatura y de pH in situ. Lo anterior mostró, entre sus resultados más notables, que junto a la existencia de cauces afluentes altamente contaminantes existían otros de buena calidad química como los esteros Chuquiananta, Guancarane y Telechuño constituyentes principales de la cuenca intermedia entre la junta de los ríos Azufre y Caracarani por aguas arriba y la junta de los ríos Colpita y LLuta por aguas abajo. Este hecho condujo a simular este sector de la cuenca como una unidad del modelo. Otra unidad se definió para la cuenca intermedia entre la junta de los ríos Colpita y LLuta por aguas arriba y LLuta en Tocontasi por aguas abajo.

2.- PLANTEAMIENTO DE UN MODELO MATEMATICO

El esquema de la figura 2 muestra la representación física simplificada de la cuenca del río LLuta aguas arriba de Tocontasi.

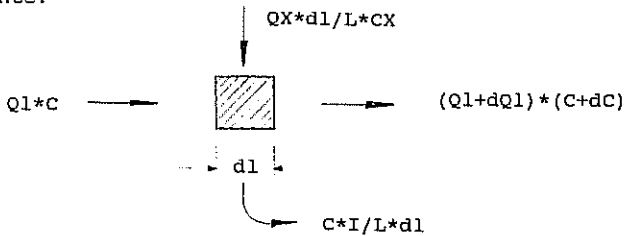
Para calcular la concentración de un determinado elemento químico en el punto 3 (C3), se supondrá válida la ley de conservación de masa; luego:

$$C_3 = \frac{C_1 * Q_1 + C_2 * Q_2}{Q_1 + Q_2} \quad (1)$$

en que C_i y Q_i son la concentración y el caudal del río en la ubicación i .

Hacia aguas abajo de la ubicación 3 se define una cuenca intermedia " X " , caracterizada por una concentración del elemento en estudio " CX " (constante en toda la cuenca), y por un caudal " QX " correspondiente al punto de salida de esta cuenca intermedia.

Para el tramo (3-4) se puede considerar un elemento de volumen de agua del cauce, con una concentración que varía entre C y $C+dC$ en la longitud dL del volumen. La ecuación de balance de masa en este elemento de volumen ubicado a una distancia l desde el punto 3, da lo siguiente:



$$Q_1 * C + QX * dl / L * CX = (Q_1 + dQ_1) * (C + dC) + C * I / L * dl \quad (2)$$

en que I es la infiltración total en el tramo.

Reduciendo términos:

$$QX * CX * dl / L = Q_1 * dC + C * dQ_1 + C * I / L * dl \quad (3)$$

Por su parte, Q_1 vale:

$$Q_1 = Q_3 + QX * l / L - I * l / L \quad (4)$$

De la ecuación (4) se obtiene:

$$dQ_1/dl = (QX - I) / L \quad (5)$$

que reemplazando en (3) da:

$$QX * CX / L = Q_1 * dc/dl + c * (QX - I) / L + c * I / L \quad (6)$$

o bien:

$$QX * CX / L = Q_1 * dc/dl + c * QX / L \quad (7)$$

separando variables:

$$L / (QX * (CX - C)) * dc = dl / Q_1 \quad (8)$$

reemplazando el valor de Q_1 , e integrando C entre C_3 y C_4 , y l entre 0 y L, se llega a:

$$\langle C_4 \rangle = CX - (CX - C_3) * (Q_4 / Q_3)^{(-QX / (QX - I))} \quad (9)$$

Distintos valores de CX e I generarán valores de $\langle C_4 \rangle$ que deben ser comparados con los valores medidos C_4 . El grado de ajuste entre las dos variables definirá la capacidad de simulación del modelo.

En la ecuación (9) se ha considerado que se cumple la ecuación de continuidad del caudal en el tramo 3-4, ($Q_3 + QX - I = Q_4$).

La evaporación desde el cauce resulta pequeña frente al caudal Q_4 , razón por la cual no se consideró en forma explícita en las ecuaciones. En efecto, para el tramo se espera una evaporación desde el cauce del orden de 20 l/s, los que frente a la magnitud de Q_4 (1.22 m³/s) representa aproximadamente un 1.5%.

Desarrollando en forma análoga el procedimiento descrito en los párrafos anteriores, para la cuenca definida como " Y " en la figura 2 se obtiene la siguiente ecuación:

$$\langle C_7 \rangle = CY - (CY - C_6) * (Q_7 / Q_6)^{(-QY / (QY - I))} \quad (10)$$

3.- PROCESO DE CALIBRACION

3.1.- CALIBRACION DEL FACTOR DE INFILTRACION I

El caudal total de infiltración I en el tramo analizado, sea éste entre Humapalca y Alcérreca o entre este último punto y Tocontasi, se obtiene en función del caudal del río. Para ello se ha utilizado un concepto similar a la tasa de pérdida en canales, la que suele expresarse en un porcentaje del caudal inicial por kilómetro de canal.

Así, I se calcula de la siguiente manera:

$$I = \alpha * \text{PROM}(Q_i, Q_f) \quad (11)$$

$$\text{en que } \alpha = 1 - (1 - tp)^n \quad (12)$$

n = número de kilómetros del tramo.

tp = tasa de pérdida en cada kilómetro en tanto por uno.

Q_i, Q_f = caudal inicial (Q₃ o Q₆) y final (Q₄ o Q₇) respectivamente.

Para realizar la calibración del factor I, se consideró la información de concentraciones y de caudal a nivel medio mensual en cada punto del modelo en que existen mediciones (puntos 1,2,4,5,6,7 de la figura 2). El tratamiento de dicha información se realizó en forma separada para los iones Sulfatos, Cloruro, Boro, Arsénico y para la Conductividad.

El proceso de calibración de este factor consistió primeramente en fijar un rango de concentraciones de cada elemento presente en la cuenca intermedia (CX o CY), para el cual el error en la estimación de la concentración en el punto de cierre de dicha cuenca intermedia (C4 o C7) fuese mínimo, llevando como parámetro el valor tp. El error se evaluó como el promedio de las diferencias al cuadrado entre el valor C4 (o C7) observado con el calculado. Los gráficos

de la figura 3 muestran un ejemplo para cada una de las dos cuencas intermedias.

Una vez encontrados los rangos de la concentración de la cuenca intermedia para los cuales el error es mínimo, se procedió a graficar el error en la estimación de C4 o C7 (esta vez representado por el promedio de la diferencias entre los valores observados con los calculados) en función de la tasa de pérdida t_p , en el rango de las concentraciones que hacen mínimas las dispersiones cuadráticas, obtenidas de los gráficos antes explicados. Los gráficos de la figura 4 muestran un ejemplo para cada una de las dos cuencas intermedias.

Ahora bien, la infiltración a lo largo del cauce no debiera depender del ión que se trata de simular, por lo tanto cada uno de los iones actúa como un trazador para determinar una tasa de infiltración única que minimice las dispersiones en todos los iones simultáneamente. Es por esta razón que se han elegido las tasas de pérdida que mejor se adaptan al conjunto de trazadores considerados; ellas son:

Cuenca X : $t_p = 2.5 \text{ \%/km}$

Cuenca Y : $t_p = 1.0 \text{ \%/km}$

3.2.- CALIBRACION DE LAS CUENCAS INTERMEDIAS X e Y

Analizada la magnitud del factor de pérdida en el cauce, y vista la factibilidad de calibrar dicho factor a niveles mensuales tanto de caudales como de concentraciones, se estimó conveniente estudiar el comportamiento del modelo utilizando valores diarios de las mismas variables. Por supuesto que los valores de t_p ya determinados se conservarán, faltando solamente definir los parámetros que controlan las cuencas intermedias (CX y CY).

Para la calibración a nivel diario se utilizaron las mediciones simultáneas de concentraciones en los diferentes puntos de control

y sus caudales diarios correspondientes, de modo de definir un vector con los datos históricos de concentración en cada punto controlado del modelo asociado a un vector de caudales diarios ocurridos para el día de la medición.

La aplicación del modelo durante la etapa de calibración permite definir un vector histórico de concentraciones y caudales que habrían ocurrido en las cuencas intermedias X e Y, simultáneamente con lo medido en cada punto controlado. Dicho vector histórico será considerado dato del proceso de simulación.

Para generar la concentración de la cuenca intermedia se utilizó una expresión simple que interpreta dicha concentración mediante dos parámetros. El primero, β_1 , es un valor base y el segundo, β_2 , agrega al valor base una variación que depende de lo observado en el área próxima. Tomando como ejemplo el tramo 3-4, la expresión es la siguiente:

$$CX = \beta_1 + \beta_2 * (Q3*C3 - Q4*C4) / QX \quad (13)$$

Con los antecedentes descritos se procedió a calibrar el modelo para los distintos iones presentes en el agua y para la conductividad. Como un ejemplo, en la figura 5 se muestran las relaciones entre la conductividad medida en los puntos 4 y 7 con la calculada en los mismos puntos durante este proceso de calibración.

4.- SIMULACION DE ALGUNAS ACCIONES

Los casos que se presentan a manera de ejemplo se refieren al efecto que produciría en la conductividad del agua las siguientes acciones:

- Acción nula o situación actual. Esto corresponde a la simulación con los valores históricos.

- Desviar el río Azufre, dejando éste de ser afluente del río LLuta.

- Desviar el río Caracarani aguas arriba de Humapalca, dejando éste de ser afluente del río LLuta.

- Desviar hacia el río LLuta el río Caguena parcialmente con un máximo de 1.07 m³/s.

- Algunas combinaciones de las acciones anteriores.

Los resultados obtenidos con las simulaciones de las acciones señaladas se muestran en la figuras 6, donde se puede ver la variación en la conductividad comparándola con la situación actual, vale decir, sin acción de ningún tipo (valor histórico simulado). En el cuadro 1 se incluye un resumen comparativo a nivel promedio de las variaciones que experimentan las concentraciones con cada una de las acciones tomadas.

De estos resultados se pueden extraer algunas conclusiones interesantes. En efecto, en relación con la desviación del río Azufre, la figura 7 muestra en el punto 4 un mejoramiento que lleva la conductividad a valores del orden de 900 µS/cm, respecto a unos 1250 µS/cm que muestra la situación actual. Sin embargo, este caudal "mejorado" se empobrece en forma natural a valores de 1800 µS/cm al llegar al punto 7, no alejándose en forma significativa de la situación actual. En otras palabras, desde el punto de vista de la conductividad en 7 habría resultado poco efectivo desviar el río Azufre, pero pueden conseguirse otros efectos favorables en algunos iones específicos, como por ejemplo el sulfato cuya influencia es de un 20 a un 30 % del caudal másico en Tocontasi.

5.- BIBLIOGRAFIA

- INGENDESA, 1992, Consultoría DEP-002 Análisis de Descontaminación y Embalse en Río LLuta Informe Cuarta Etapa Proposición de Medidas de Descontaminación, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Riego.
- Luis Arrau D. y Silvia Sánchez F., 1991, Evaluación del Impacto de las Alternativas de Regulación y Control de

Calidad de las Aguas del Río LLuta, X Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, Volumen I.

- Hans Niemeyer F., 1968, Estudio del Valle del Río LLuta, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Riego.

CUADRO 1

CUENCA DEL RIO LLUTA
MODELO CALIDAD DE AGUAS

COMPARACION DE ALTERNATIVAS
CONDUCTIVIDAD (μ S/cm)

CONDICION SIMULADA	C4 (μ S/cm)	DELTA (%)	C6 (μ S/cm)	DELTA (%)	C7 (μ S/cm)	DELTA (%)
(1) SITUACION ACTUAL	1249		1731		1926	
(2) DESVIACION AZUFRE	927	-26	1537	-11	1841	-4
(3) DESVIACION CARACARANI	1169	-6	1728	-0	1933	0
(4) CAPTACION CAQUENA	--	--	1517	-12	1754	-9
(2) + (3)	820	-34	1532	-11	1853	-4
(3) + (4)	--	--	1503	-13	1754	-9
(2) + (4)	--	--	1399	-19	1689	-12
(2) + (3) + (4)	--	--	1389	-20	1692	-12

NOTAS:

- 1.- DELTA (%) INDICA LA VARIACION PORCENTUAL QUE EXPERIMENTA LA CONDICION ACTUAL DEL AGUA CON RESPECTO A LAS DISTINTAS ACCIONES SIMULADAS.
- 2.- C4 : Caracarani en Alcérreca
C6 : LLuta en Alcérreca
C7 : LLuta en Tocontasi

FIGURA 1

CUENCA DE LOS RIOS LLUTA Y CAQUENA

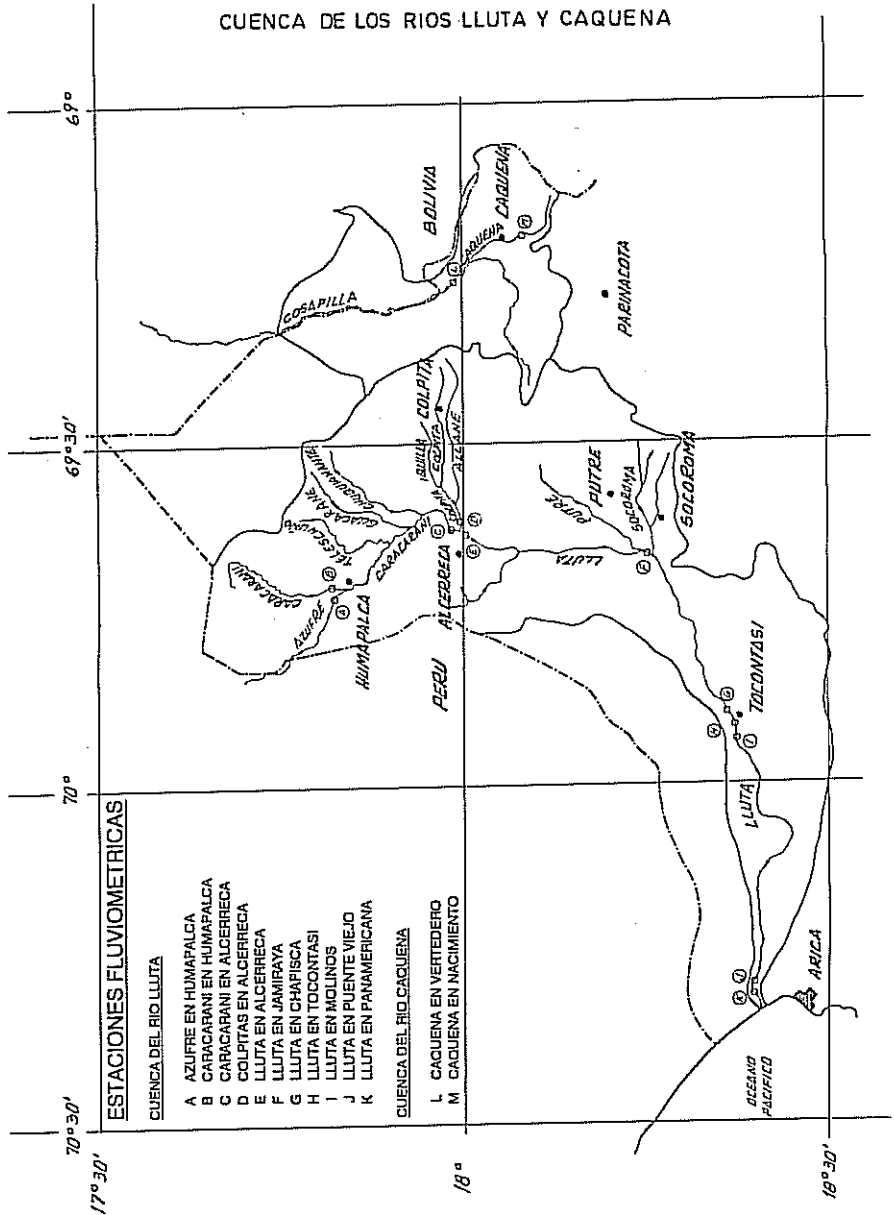


FIGURA 2
 MODELO CONCEPTUAL

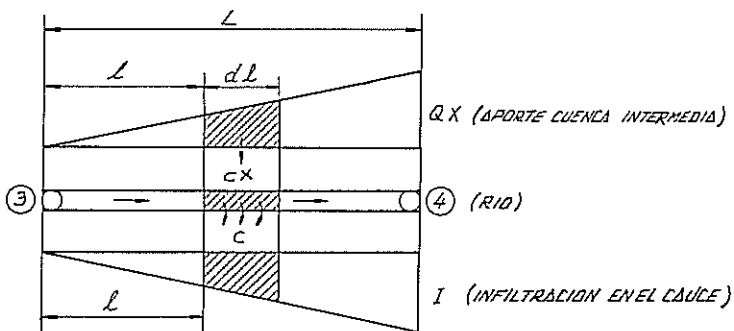
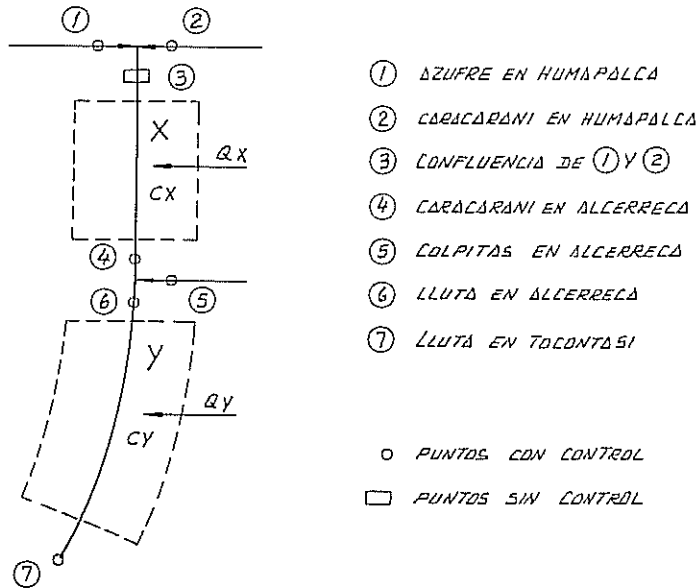


FIGURA 3

MODELO CALIDAD DE AGUAS RIO LLUTA
 CALIBRACION TASA DE PERDIDA EN EL CAUCE (tp % / km)

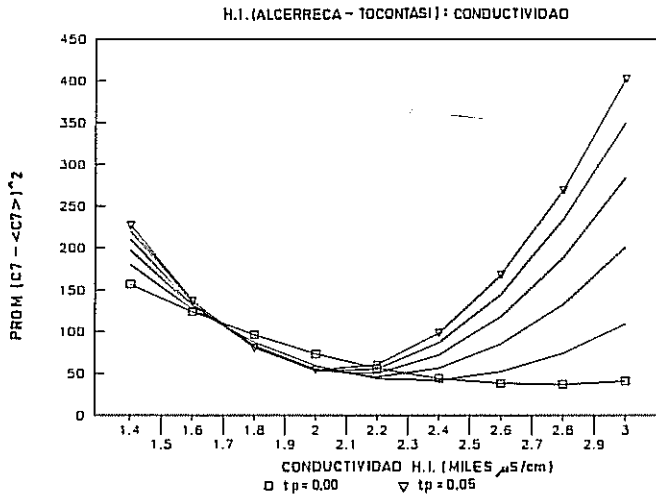
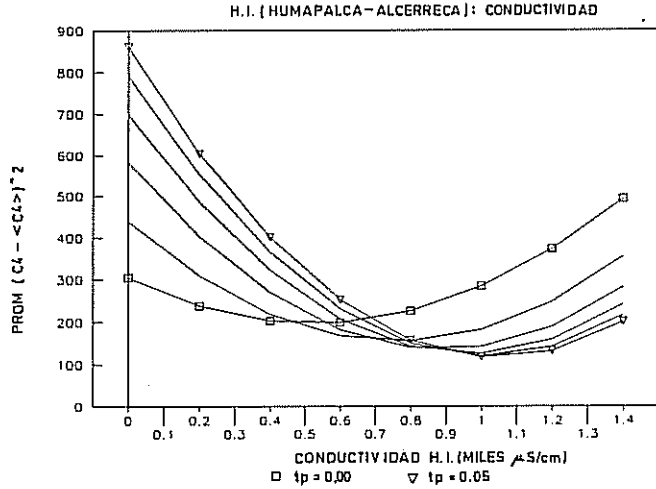
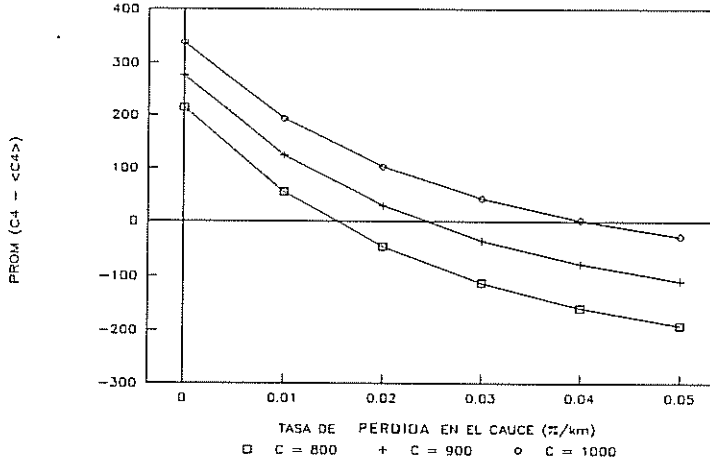


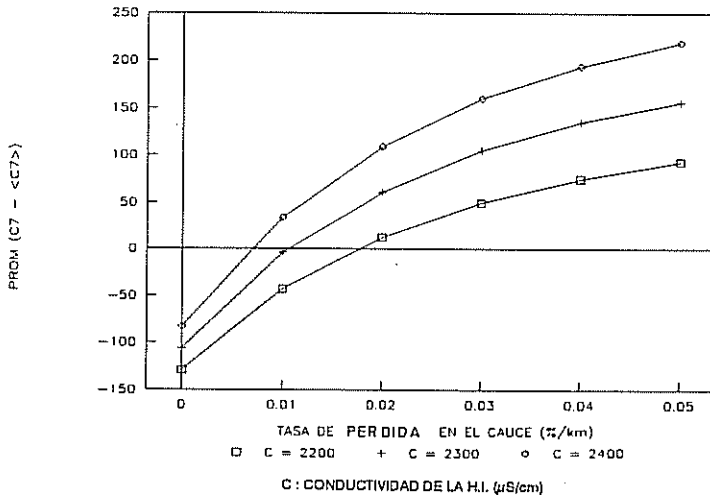
FIGURA 4

MODELO CALIDAD DE AGUAS RIO LLUTA
CALIBRACION TASA DE PERDIDA EN EL CAUCE (tp % / km)

H.I.(HUMAPALCA-ALCERRECA):CONDUCTIVIDAD



H.I.(ALCERRECA-TOCONTASI):CONDUCTIVIDAD



C : CONDUCTIVIDAD DE LA H.I. ($\mu\text{S/cm}$)

FIGURA 5

MODELO CALIDAD DE AGUAS RIO LLUTA

CALIBRACION MODELO CONDUCTIVIDAD
(C4 = CARACARANI EN ALCKERRECA , C7 = LLUTA EN TOCONTASI)

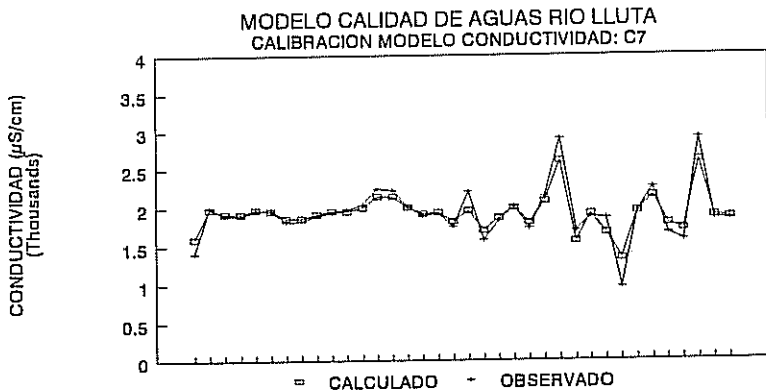
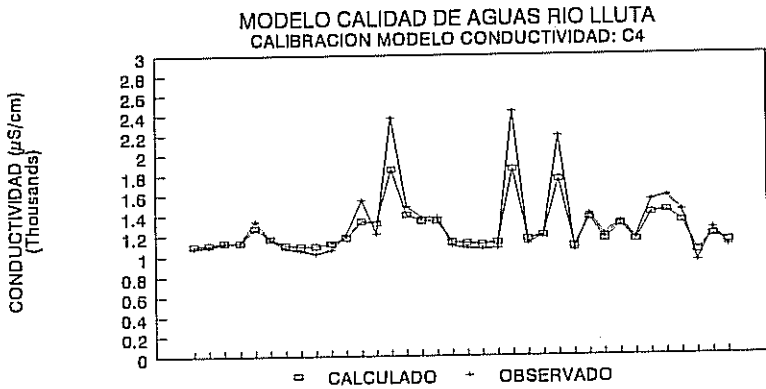


FIGURA 6

MODELO CALIDAD DE AGUAS DEL RIO LLUTA
SIMULACION DE ALGUNAS ACCIONES
(C7 : LLUTA EN TOCONTASI)

