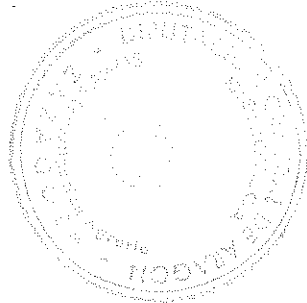


IMPACTO ECONOMICO DE LA SALINIDAD EN LA AGRICULTURA
DE LA CUENCA DEL GALLEGO

DOCUMENTO DE TRABAJO 87/1

SERVICIO DE INVESTIGACION AGRARIA
UNIDAD DE ECONOMIA Y SOCIOLOGIA AGRARIAS





IMPACTO ECONOMICO DE LA SALINIDAD EN LA AGRICULTURA
DE LA CUENCA DEL GALLEGO

DOCUMENTO DE TRABAJO 87/1

LUIS MIGUEL ALBISU
JOSÉ MARÍA GIL

RAMÓN ARAGÜÉS

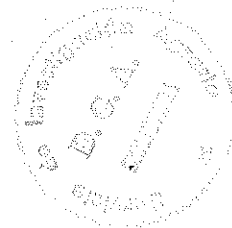
UNIDAD DE ECONOMÍA Y
SOCIOLOGÍA AGRARIA

UNIDAD DE SUELOS Y
RIEGOS

SERVICIO DE INVESTIGACIÓN AGRARIA
DIPUTACIÓN GENERAL DE ARAGÓN
ZARAGOZA

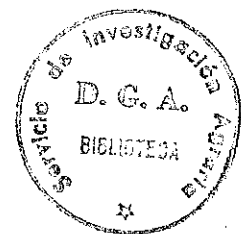


INDICE



	Pág.
I. INTRODUCCION	1
1. La salinidad en la agricultura	1
2. Efectos de la salinidad en la agricultura	2
3. Justificación y objetivos	4
4. Metodología	6
II. SITUACION ACTUAL	12
1. Marco geográfico	12
2. Metodología	15
3. Datos seleccionados	16
3.1. Cultivos más importantes de la zona	16
3.2. Determinación de las necesidades de agua para cada cultivo	18 ✓
3.3. Cálculo del rendimiento obtenido por los cultivos	20
3.4. Obtención de los márgenes brutos de los diferentes cultivos	21 ✓
3.5. Superficie total cultivada de la zona	22
3.6. Disponibilidades de agua de riego en la zona	23 ✓
3.7. Cálculo de la producción de cada cultivo	23 ✓
3.8. Necesidades de mano de obra para cada cultivo	24 ✓
3.9. Disponibilidades de mano de obra en la zona	24 ✓
4. Modelo empleado	26 ✓
5. Resultados	31
6. Efecto de la salinidad sobre los rendimientos de los cultivos	34
7. Pérdidas originadas por la salinidad	40
III. SITUACION FUTURA	45
1. Nivel de salinidad en el futuro	45
1.1. Estimación anual	47
1.2. Estimación mensual	52
1.3. Futuro nivel de salinidad	56
2. Estimación de pérdidas futuras	58
3. Soluciones al problema de la salinidad	65

IV RESUMEN Y CONCLUSIONES	77
1. El problema	77
2. Metodología	78
3. Descripción de la situación actual y estimación de las pérdidas actuales	79
3.1. El modelo	79
3.2. Impacto económico actual de la salinidad	82
4. Estimación de las pérdidas futuras debido a la salinidad	84
5. Control de la salinidad	88
6. Limitaciones	90
7. Conclusiones	91
REFERENCIAS	92
ANEJOS	99
Anejo I : Superficie de regadío ocupada por los cultivos de la zona	99
Anejo II : Necesidades mensuales de agua de los cultivos	103
Anejo III : Precios de productos y factores	109
Anejo IV : Costes proporcionales de los cultivos	112
Anejo V : Salinidad de la acequia Urdán	119
Anejo VI : Caudal medio mensual del Gállego en Ardisa	121
Anejo VII : Meses de riego para los diferentes cultivos	123
Anejo VIII: Caudal del Gállego en Ardisa	125



INDICE DE CUADROS



	Pág.
Cuadro 1. Parámetros climáticos de Fuentes de Ebro (Zaragoza)	13
Cuadro 2. Principales ventajas e inconvenientes de los diferentes tipos de riego	14
Cuadro 3. Superficie media de regadío ocupada por los principales cultivos de la zona	17
Cuadro 4. Necesidades mensuales de agua de los principales cultivos (m ³ /ha)	20
Cuadro 5. Rendimientos de los principales cultivos de la zona (kg/ha)	21
Cuadro 6. Valores de los principales parámetros usados para el cálculo de los márgenes brutos	22
Cuadro 7. Disponibilidades medias de agua en las acequias de Urdán y Rabal	24
Cuadro 8. Superficies, rendimientos y producciones en los principales cultivos de la zona	25
Cuadro 9. Necesidades de mano de obra de los principales cultivos (horas/ha)	26
Cuadro 10. Superficie por cultivos (ha)	31
Cuadro 11. Disminución de rendimientos según los niveles de salinidad (%)	36
Cuadro 12. Salinidad en la acequia Urdán en 1980, 1981 y 1982 (mmho/cm)	37
Cuadro 13. Efecto de la salinidad sobre los rendimientos de los cultivos de la zona (%)	38
Cuadro 14. Rendimientos de los cultivos de la zona sin aguas salinas (kg/ha)	41
Cuadro 15. Producción mínima, máxima y margen bruto sin salinidad ...	42
Cuadro 16. Superficie y márgenes brutos sin salinidad	44
Cuadro 17. Estimación anual de la salinidad de la acequia Urdán	50
Cuadro 18. Estimación mensual de la salinidad de la acequia Urdán ...	54
Cuadro 19. Estimaciones de los rendimientos de los cultivos de la zona dentro de 30 años	59
Cuadro 20. Estimación de la producción y margen bruto de los cultivos de la zona dentro de 30 años	60

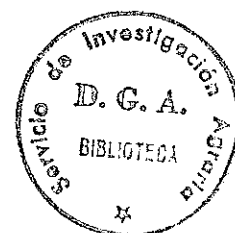


Cuadro 21. Superficie futura de los cultivos de la zona y margen bruto total	62
Cuadro 22. Acciones y objetivos tendentes a minimizar la salinización de las aguas	66
Cuadro 23. Necesidades de agua de frutales y hortalizas en un sistema de riego por goteo (m^3/sg)	72
Cuadro 24. Rendimientos, producciones y márgenes futuros de los cultivos con riego por goteo	72
Cuadro 25. Superficies futuras de los cultivos bajo la hipótesis de riego por goteo	74
Cuadro 26. Costes del sistema de riego por goteo (pta/ha)	75

A N E J O S

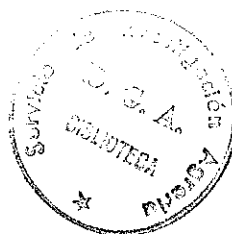
Cuadro 1. Superficie de regadío ocupada por los cultivos de la zona	100
Cuadro 2. Necesidad mensual de agua para el trigo y la cebada	104
Cuadro 3. Necesidad mensual de agua para el maíz	104
Cuadro 4. Necesidad mensual de agua para la alfalfa	105
Cuadro 5. Necesidad mensual de agua para los frutales	106
Cuadro 6. Necesidad mensual de agua para la patata	107
Cuadro 7. Necesidad mensual de agua para la huerta	108
Cuadro 8. Precio de los productos (pta/kg)	110
Cuadro 9. Precios de las semillas	110
Cuadro 10. Precios de los abonos (pta/kg) y combustible (pta/h)	111
Cuadro 11. Coste proporcional del trigo	113
Cuadro 12. Coste proporcional de la cebada	113
Cuadro 13. Coste proporcional del maíz	113
Cuadro 14. Coste proporcional de la alfalfa	114
Cuadro 15. Coste proporcional del manzano	114
Cuadro 16. Coste proporcional del peral	114
Cuadro 17. Coste proporcional del melocotonero	115
Cuadro 18. Coste proporcional del albaricoquero	115
Cuadro 19. Coste proporcional de la patata	116
Cuadro 20. Coste proporcional del espárrago	116
Cuadro 21. Coste proporcional de la lechuga	117
Cuadro 22. Coste proporcional del tomate	117

Cuadro 23. Coste proporcional de la cebolla	118
Cuadro 24. Coste proporcional de la alcachofa	118
Cuadro 25. Salinidad media mensual de la acequia Urdán (CE, mmho/cm).	120
Cuadro 26. Caudal medio mensual del Gállego en Ardisa (m ³ /sg).....	122
Cuadro 27. Meses de riego para los diferentes cultivos	124
Cuadro 28. Caudal del Gállego en Ardisa (m ³ /sg)	126



INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Relación entre el nivel de salinidad (ECw) y el descenso de los rendimientos (%)	39



I. INTRODUCCION

1. La salinidad en la agricultura

El agua usada para riego en agricultura contiene siempre una cantidad de sólidos disueltos que reciben el nombre genérico de sales. El origen de estas sales es muy diverso pero generalmente provienen de la meteorización de los minerales presentes en el suelo o subsuelo.

La calidad del agua de riego viene determinada, por la clase y cantidad de sales disueltas. La concentración total de sales es el parámetro más importante para determinar la calidad del agua de riego desde el punto de vista de la salinidad. Históricamente este parámetro ha sido definido como el total de sólidos disueltos (TDS), calculado mediante la evaporación de un volumen dado de agua y posterior pesada de las sales precipitadas. Tal medida no está libre de una cierta ambigüedad, ya que la mayor parte de estas sales pueden alcanzar diferentes estados de hidratación, dependiendo de la temperatura de evaporación. La unidad de medida utilizada son partes por millón (ppm) o miligramos por litro (mg/l) de TDS, siendo más correcto utilizar esta última.

Scofield (1942) introdujo la conductividad eléctrica (CE) como un índice más simple para medir la concentración de sales. Aunque el equipo requerido para hacer esta medición es más costoso, el ahorro de tiempo y su eficiencia compensan con creces la inversión.

La medición de la conductividad eléctrica está basada en el principio de que la cantidad de corriente eléctrica transmitida a través de un electrolito se incrementa a medida que aumenta su concentración de sales. Para hacer esta medición se coloca una muestra de la solución entre dos electrodos (de diseño estandarizado) y se establece una corriente eléctrica entre los mismos. La resistencia de la solución bajo estas condiciones es entonces medida y convertida a resistencia recíproca o conductividad. Como la unidad básica para la medida de la resistencia es el ohm, la unidad de la conductividad (o resistencia recíproca) es el mho. El resultado es multiplicado por una constante expresada en cm^{-1} con el fin de corregir el factor geométrico de la medida. El valor resultante de la conductividad eléctrica específica -

vendrá expresado por tanto en mho/cm, mmho/cm o μ mho/cm. Como la CE de una solución se incrementa aproximadamente a razón de un 2% por cada grado centígrado, se suelen estandarizar las medidas tomando como referencia una temperatura de 25°C.

Las medidas de TDS y EC se pueden relacionar mediante la siguiente fórmula:

$$\text{TDS (ppm)} = 640 \text{ CE (mmho/cm)}$$

aunque este factor de conversión varía entre 500 y 1.000 según la concentración y composición iónica de la solución.

2. Efectos de la salinidad en la agricultura

Los efectos negativos de la salinidad (Aragüés y Alberto, 1983) sobre la salud, los usos domésticos, industriales y agrícolas son evidentes. Ciertos niveles de salinidad se han correlacionado positivamente con la incidencia de litiasis e hipertensión y negativamente con la incidencia del infarto de miocardio. La baja calidad del agua produce gastos adicionales para la adquisición de aguas de bebida, mayores cantidades de jabones, etc. así como mayores gastos de mantenimiento en las partes metálicas de las conducciones de agua. La industria precisa mayores gastos en desincrustantes y ablandantes, así como en el mantenimiento de las instalaciones. La agricultura se ve afectada por los incrementos salinos de las aguas de riego con un descenso de los rendimientos de los cultivos tradicionales y un aumento de las necesidades de agua y de drenaje.

A efectos ilustrativos, para la cuenca del río Colorado, se ha estimado que las pérdidas anuales debidas al incremento de un mg/l de concentración ascienden a 450.000 \$ (de 1980), de las cuales un tercio correspondían a la agricultura (Laughlin et al., 1980).

Los efectos adversos de las sales (Bresler, 1982) se dividen generalmente en tres categorías:



1) El más importante es el efecto osmótico, el cual afecta a la capacidad de absorción del agua por la planta debido al descenso del potencial total del agua en el suelo.

2) Una segunda categoría incluye el efecto de toxicidad iónica específica que afecta a determinados procesos fisiológicos de algunas plantas -- sensibles.

3) Una tercera categoría incluye el efecto del ion sodio sobre la estabilidad estructural del suelo. Así un exceso de sodio puede conducir a la degradación del suelo y consiguientes efectos negativos sobre su conductividad hidráulica, aireación y penetrabilidad.

En ausencia de efectos de iones específicos, la reducción del crecimiento de la planta debida a la salinidad está generalmente relacionada con el potencial osmótico de la solución existente en la zona de raíces. Dentro de unos límites razonables puede afirmarse (Bernstein, 1975; Maas y Hoffman-1977) que el potencial osmótico está inversamente relacionado con la conductividad eléctrica.

El descenso del potencial osmótico tiene como resultado la reducción de la disponibilidad de agua para las plantas. De ahí que las plantas que -- crecen en suelos salinos tengan con frecuencia un aspecto similar al producido por stress hídrico.

Las plantas afectadas por la salinidad están generalmente mal desarrolladas. Las hojas son más pequeñas, aunque pueden ser más gruesas que las de plantas normales y además son a menudo de un verde más oscuro. Los desequilibrios en el crecimiento de los frutales son también muy evidentes.

La sensibilidad de las plantas a la salinidad varía según sea el estado de crecimiento en que se encuentren. Así por ejemplo, cebada, maíz, arroz y trigo son más sensibles durante la emergencia y primeras etapas de crecimiento que durante la germinación y etapas posteriores de crecimiento, incluido el desarrollo del grano. Sin embargo cultivos como la remolacha son más sensibles durante la germinación. Para evitar el fracaso de la cosecha,

el agricultor debe conocer la sensibilidad de cada cultivo a la salinidad en cada una de sus etapas de crecimiento y adoptar las prácticas pertinentes para minimizar el daño debido a la salinización.

Dada la irreversibilidad del proceso de la salinización de las aguas se ha de aprender a convivir con este problema, lo que en modo alguno debe significar una aceptación pasiva de sus efectos negativos ni una limitación del uso del agua, sino buscar entre las posibles soluciones la más viable para minimizar los aportes salinos, tanto de origen natural como de los derivados del uso del agua.

Diversos autores han tratado de evaluar, en diferentes países, los perjuicios económicos causados por la salinidad en la agricultura. Sobresalen los trabajos de Moore et al. (1974) y Laughlin et al (1980) para el río Colorado en Texas y Oklahoma; Fapohunda y Hill (1981) para el río Hadejia (Nigeria); Dudek y Horner (1985) para el valle de San Joaquín (California) y Callinan y Webster (1971) para el río Murray (Australia).

3. Justificación y objetivos

El contenido en sales de las aguas del tramo medio y final del río Ebro es en la actualidad alto, debido a las condiciones geológicas y climáticas de la depresión del Ebro. Por otro lado, el desarrollo agrícola, industrial y demográfico de la Cuenca del Ebro, ha conducido al aumento del uso consultivo de sus aguas, produciéndose en consecuencia un incremento de la salinidad que, en algunos ríos, se ha establecido hasta en 15 mg/l de incremento anual de los sólidos disueltos totales (Aragüés y Alberto, 1983). Tanto los niveles actuales de salinidad como las curvas de tendencia establecidas pueden ocasionar serios problemas a parte de los usuarios del agua en la cuenca. En consecuencia se ha propuesto en este trabajo analizar el impacto económico que este proceso de salinización de las aguas tiene sobre la agricultura de regadío.

Por motivos de disponibilidad de datos se ha restringido el estudio a la cuenca del río Gállego y más concretamente a la zona regada por dos acequias: Urdán y Rabal. Según mediciones semanales efectuadas en los últimos años, la salinidad alcanza valores de CE que oscilan entre 1,5 y 3,0 mmho/cm en las épocas de riego.

Se ha considerado un horizonte temporal de 30 años, ya que al cabo de ese tiempo el incremento de la concentración puede ser lo suficientemente importante como para producir pérdidas elevadas en la agricultura. Para alcanzar este objetivo general se han planteado una serie de sub-objetivos:

1. Describir la situación actual de la agricultura de la zona, seleccionando los principales cultivos con sus correspondientes márgenes brutos.
2. Analizar las pérdidas que actualmente ocasiona la salinidad del agua de riego.
3. Establecer la tendencia de salinización del agua de riego y predecir su salinidad dentro de 30 años.
4. Evaluar las pérdidas debidas exclusivamente a la salinidad. Por tanto no se entrará a considerar cuestiones de mercado (fluctuaciones de precios, etc.) ni las pérdidas o ganancias debidas a otros factores como pueden ser climáticos o relativos a la administración de la tierra (mejora de fertilizantes y abonos, nuevas tecnologías, nuevas variedades de cultivo, etc.) por parte de los agricultores.
5. Aportar soluciones que, en mayor o menor medida, permitan reducir la influencia negativa de las sales sobre la agricultura y la viabilidad de las mismas.
6. Desarrollar una metodología apropiada a los objetivos anteriormente citados, que tenga la suficiente versatilidad para introducir los principales cambios previstos, de aquí a 30 años, atendiendo a los previsibles niveles de salinidad.

4. Metodología

La metodología fundamental utilizada para analizar el problema se basa en las técnicas de la programación lineal. La posibilidad de introducir restricciones físicas en el modelo le confiere la flexibilidad suficiente como para describir la situación actual de la agricultura de la zona en lo que se refiere a superficie cultivada. La programación lineal es un instrumento eficaz para estimar los cambios producidos en la agricultura mediante el análisis de sensibilidad. En este caso se ha estudiado el descenso de los rendimientos económicos producto de concentraciones salinas significativamente altas.

Laughlin et al. (1980), en su estudio sobre los efectos de la salinidad en el río Colorado, diseñaron una programación lineal en el que la función objetivo era el margen neto sujeto a dos tipos de restricciones: la cantidad de superficie existente para cada tipo de suelo en cada uno de los tramos en los que habían dividido el río y la cantidad de agua disponible para riego en cada zona. Las incógnitas eran la superficie de cada cultivo para cada tipo de suelo.

Dudek y Horner (1980), en su trabajo sobre el Valle de San Joaquín - diseñaron un modelo de programación lineal para 30 cultivos, 18 tipos diferentes de suelo, 3 condiciones de drenaje y 4 zonas. La función objetivo era la maximización de los márgenes netos sujetos a la disponibilidad de tierra, de agua para riego, trabajo (costes de la mano de obra) y restricciones que hacían referencia a hábitos de cultivo que subyacían en la tecnología productiva.

Moore (1981) presentó un análisis económico del impacto del riego con aguas salinas en el Valle Imperial en California en el marco de una explotación agrícola. Se consideran 3 tipos de explotaciones, distinguiéndose por el nivel de salinidad y la cantidad de agua aplicada. Utilizando información sobre la respuesta de los cultivos a la combinación de suelo y a la salinidad Moore formula combinaciones alternativas de nivel de agua y salinidad para nueve cultivos que son incorporados a un programa lineal para realizar

análisis de planificación de las explotaciones. El objetivo considerado fue maximizar los rendimientos netos de cada tipo de explotación en un único año bajo las condiciones expuestas.

Young y Leathers (1981) utilizan la programación lineal para analizar el impacto económico de las políticas dirigidas a controlar el riego con -- aguas salinas en un marco regional.

Heady et al. (1981) utilizan la misma metodología pero en un marco nacional donde lo que se pretende es optimizar la localización de la producción agrícola, teniendo en cuenta los diferentes niveles salinos y la resistencia de los diferentes cultivos a la salinidad.

La programación lineal ha sido la metodología comúnmente aceptada para resolver este tipo de problemas. La estructura de dicho programa lineal -- es la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Max } Z &= C'X \\ \text{Sujeto a } Ax &\leq b \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

donde Z es la función objetivo (normalmente beneficio, margen bruto o margen neto) compuesta por un producto escalar de C' y X; X es un vector de variables de decisión (normalmente superficie cultivada) y C' es un vector que -- proporciona las correspondientes contribuciones de estas variables a la función objetivo. El vector b representa las restricciones físicas, institucionales, etc., que definen el entorno o la zona en la que se realiza el estudio y A es una matriz donde se recogen las relaciones técnicas entre las variables y las restricciones.

A pesar de la profusa utilización de la programación lineal en temas agrícolas, presenta algunos inconvenientes como pueden ser: la hipótesis de que todas las relaciones subyacentes son lineales o bien que se utiliza un -- único criterio de decisión. Se han hecho ya considerables progresos para tratar de solventar este tipo de limitaciones sobre todo en lo que hace referencia a la hipótesis de linealidad; sin embargo, y a pesar de que existe un reconocimiento general de que la utilización de un único criterio de de-



cisión no es siempre válido, se ha hecho poco para tratar de desarrollar una metodología capaz de solucionar esta limitación. Generalmente cualquier decisor está más interesado en encontrar un equilibrio entre objetivos que entran en conflicto que en optimizar un único objetivo. Más aún, en la vida -- real la disponibilidad de recursos no es tan rígida como la que viene impuesta por las restricciones de un programa lineal tradicional y que no pueden ser violadas bajo ningún concepto. La necesidad de encontrar un equilibrio entre objetivos múltiples ha sido objeto de algunas publicaciones (Gasson, 1973; Harper y Eastman, 1980; Ignizio, 1976). Los dos primeros únicamente aportan evidencias empíricas acerca de la multiplicidad de metas u objetivos que pretenden los agricultores. Asimismo ha habido distintas aplicaciones prácticas en el campo a la decisión (Cohan, 1978; Zeleny, 1982), algunas de ellas en el campo agrícola (Wheeler y Rusell, 1978; Flinn et al., 1980; Barnett et al. 1982; Romero y Rehman, 1984).

Parece lógico pensar que un modelo con múltiples objetivos es capaz de representar con más fidelidad la realidad. Es por ello por lo que se ha decidido aplicar para la solución del problema un tipo de programación que considera esta multiplicidad.

A continuación se exponen los conceptos teóricos básicos de este tipo de programación. El planteamiento del problema, el tratamiento analítico del mismo y la solución serán objeto de una exposición posterior.

Entre los conceptos básicos, los más importantes son los siguientes:

Un nivel de aspiración es un nivel aceptable de logro para cada uno de los objetivos del decisor. Combinando un objetivo con un nivel de aspiración tenemos una meta.

Por ejemplo: $Z = aX_1 + bX_2$ representa un objetivo
 $aX_1 + bX_2 \geq c$ representa una meta.

Las metas y restricciones tienen pues la misma estructura matemática y pueden por tanto parecer idénticas. La diferencia entre ambas estructuras radica en la parte derecha de la desigualdad. En el caso de las metas la parte derecha está compuesta por niveles de aspiración que el decisor pretende lograr, niveles que pueden ser alcanzados o no, mientras que con las restricciones la parte derecha debe ser satisfecha obligatoriamente, ya que en caso contrario la solución obtenida es no posible.

Existen básicamente dos aproximaciones matemáticas que son capaces de resolver problemas con múltiples objetivos. La programación multiobjetivo -- (MOP) y la programación por metas (GP). La diferencia entre ambas radica en lo siguiente: MOP trabaja con varios objetivos limitados por un conjunto de restricciones, normalmente lineales, tratando de generar un conjunto de soluciones no dominadas en vez de buscar un óptimo. Los elementos de este conjunto no dominado son soluciones posibles y no puede haber otra solución posible que proporcione valores mejores para algún objetivo (es decir son óptimos en el sentido paretiano).

La programación por metas (metodología seguida en este trabajo), lo que trata es de minimizar la desviación entre la solución resultante y la meta deseada por el decisor. Los objetivos son incluidos en el modelo, transformando las desigualdades en igualdades mediante la adición de dos variables de desviación, una positiva y otra negativa que muestren si el objetivo no ha sido alcanzado por defecto o por exceso, tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tipo de objetivo	Formulación del objetivo en el modelo	Variables de desviación que debe ser minimizada
$f_i(x) \leq b_i$	$f_i(x) + n_i - \rho_i = b_i$	ρ_i
$f_i(x) \geq b_i$	$f_i(x) + n_i - \rho_i = b_i$	n_i
$f_i(x) = b_i$	$f_i(x) + n_i - \rho_i = b_i$	$n_i + \rho_i$

El proceso de minimización de estas variables de desviación se va a realizar buscando lo que se denomina un mínimo lexicográfico. Esta forma de minimización fue introducida por Charnes y Cooper (1961) y desarrollada por Ijiri (1965), Lee (1972) e Ignizio (1976). La idea subyacente en este proceso de optimización es que cualquier decisor puede establecer prioridades -

en la consecución de los distintos objetivos, de tal forma que preferirá -- cualquier solución que minimice la desviación en el objetivo prioritario, -- aunque en los demás objetivos la solución proponga desviaciones mayores.

Resumiendo, los pasos que han de seguirse en la construcción de un modelo de programación por objetivos son los siguientes (Ignizio, 1982):

1) Desarrollar un modelo matemático donde se enumeren los objetivos a optimizar, así como las restricciones consideradas para la solución de un de terminado problema.

2) Especificar los niveles que se desean alcanzar para cada objetivo.

3) Incluir variables de desviación negativas y positivas para todas y cada una de las restricciones y de los objetivos.

4) Especificar niveles de prioridad para cada objetivo.

5) Establecer la función de logro, o vector de desviaciones a minimizar.

Analíticamente el modelo toma la siguiente forma:

Encontrar $x = (x_1, x_2 \dots x_n)$ que

minimice lexicográficamente $a = (g_1(n, \rho), g_2(n, \rho) \dots g_k(n, \rho))$ $j = 1 \dots k$
son prioridades.

Sujeto a

$$f_i(x) + n_i - \rho_i = b_i \quad i = 1, 2 \dots m$$

$$x, n, \rho \geq 0$$

Para concluir es necesario mencionar algunas limitaciones que presenta la programación por objetivos:

1) La posibilidad de proporcionar idénticas soluciones a las proporcionadas por la programación lineal tradicional.

2) La hipótesis inherente a la minimización lexicográfica en el sentido de que aunque pueden recogerse las compensaciones entre objetivos de un mismo nivel de prioridad, estas no se recogen si son entre objetivos de diferentes niveles de prioridad.

3) La susceptibilidad de la programación por objetivos de proporcionar soluciones óptimas inferiores a las proporcionadas por la programación lineal tradicional.

4) El problema teórico subyacente en la programación por objetivos, en el sentido de que la minimización del vector de logro no es compatible con la optimización de la función de utilidad del centro decisor.



II. SITUACION ACTUAL

1. Marco geográfico

El área objeto de estudio va a limitarse, por razones puramente empíricas ya mencionadas en el capítulo introductorio, a una parte de la cuenca del Gállego. Es evidente que el problema salino no afecta a toda la cuenca por igual. La Comisaría de Aguas del Ebro tiene situadas tres estaciones de control de calidad (red COCA) a lo largo del río Gállego (Ardisa, Zuera y Zaragoza).

Desde el nacimiento del Gállego hasta la estación de Ardisa la salinidad no es un problema ni siquiera leve. La única fuente de contaminación - la proporcionan las industrias localizadas en Sabiñánigo y su comarca. Por el contrario en las proximidades de Zuera desemboca en el Gállego el barranco de la Violada y se reciben aguas subterráneas que proporcionan una elevada cantidad de sales. Dado que la toma de datos en esa zona es muy reciente, los mismos no son suficientes para la consecución de los objetivos propuestos. Más al sur se encuentran situadas las tomas de agua de dos acequias: Urdán y Rabal, que son importantes por la superficie que riegan y por sus apreciables niveles de salinidad.

Nuestro estudio se limita a la comarca regada por estas dos acequias en la que el agua de riego ha alcanzado una conductividad media en los últimos 10 años de casi 2 mmho/cm.

La acequia de Rabal tiene su toma de agua en el término municipal de Villanueva de Gállego y riega la margen derecha del río hasta su desembocadura en el Ebro en Zaragoza.

La acequia de Urdán tiene su toma de agua en la Cartuja de Aula Dei y riega la margen izquierda del Gállego y del Ebro hasta el término municipal de Villafranca de Ebro.

En conjunto las dos acequias riegan una extensión que sobrepasa las 14.000 ha pertenecientes a los términos municipales de: Alfajarín, Nuez de Ebro, Pastriz, Puebla de Alfindén, Villafranca de Ebro, Villanueva de Gállego y Zaragoza.

El clima predominante es el Mediterráneo continental templado. Los valores medios de sus variables climáticas quedan reflejados en el cuadro 1.

Cuadro 1. Parámetros climáticos de Fuentes de Ebro (Zaragoza)

VARIABLES CLIMÁTICAS	VALOR MEDIO
Temperatura media anual	14 a 15°C
Temperatura media mes más frío	5 a 6°C
Temperatura media mes más cálido	23 a 25°C
Duración media del periodo de heladas	5 a 6 meses
E.T.P. media anual	800 a 900 mm
Precipitación media anual	300 a 400 mm
Déficit hídrico medio anual	500 a 550 mm
Duración media del periodo seco	4 a 5 meses
Precipitación de invierno	21 %
Precipitación de primavera	30 %
Precipitación de otoño	29 %

Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Mapas de cultivos y aprovechamientos.

Dadas las condiciones climáticas existentes en la zona son posibles los siguientes cultivos: cereales para grano y forraje de invierno y primavera (trigo, cebada, avena, arroz, maíz, etc), leguminosas (judías, habas - garbanzos..), cultivos industriales, tanto textiles (lino y cáñamo) como oleaginosas, cultivos forrajeros, hortalizas y frutales no cítricos de pepita y hueso, vid, olivo.

Los sistemas de riego empleados se pueden clasificar en los tres grupos siguientes (Faci, 1986): 1) aspersión, 2) riego de superficie y 3) riego por goteo.

Las ventajas e inconvenientes de estos sistemas de riegos vienen recogidos en el cuadro 2.

Cuadro 2. Principales ventajas e inconvenientes de los diferentes tipos de riego.

Tipo de riego	Ventajas	Inconvenientes
Aspersión	<ol style="list-style-type: none"> 1. No hace falta nivelación. 2. Existe un perfecto control sobre la cantidad de agua aplicada. 3. Se puede aumentar la frecuencia del riego. 4. Se puede automatizar. Reducción de mano de obra. 5. Apto para suelos arenosos y no homogéneos. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Un coste alto para el uso de energía. 2. El viento afecta la distribución. 3. Se pueden producir pérdidas por evaporación. 4. Dispersión de partículas en la superficie del suelo.
Superficie	<ol style="list-style-type: none"> 1. No hay consumo de energía. 2. Fácil mecanización. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Elevado coste de formación de terrazas y bancales. 2. No es posible con pendientes altas. 3. No hay control sobre el volumen de riego aplicado.
Goteo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Util cuando el agua es escasa o salina. 2. Ahorra agua en plantaciones jóvenes y plantas espaciadas. 3. Se pueden regar zonas con elevadas pendientes. 4. Sistemas automatizados. 5. Mayor control de malas hierbas. 6. Alta eficiencia. 7. Aplicación de abonos a través del sistema. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Las obturaciones suponen problemas importantes: limos y arcillas, bacterias, algas, precipitados químicos. 2. Se producen acumulación de sales alrededor de las zonas humedecidas por los goteros. 3. Humedecimiento de solo una porción del suelo.

Fuente: J. Faci. Comunicación personal.

2. Metodología

El objetivo que se plantea en esta primera parte del trabajo es doble: por un lado interesa construir un modelo que permita describir la realidad actual y, por otro lado, se trata de hallar el coste actual de la salinidad en términos de pérdida de margen bruto global.

Ya se ha mencionado en el capítulo introductorio que la metodología propuesta va a ser la programación por metas (goal programming). Los objetivos a optimizar van a ser tres:

- i) Minimizar el agua destinada a riego (como bien escaso que es)
- ii) Maximizar el margen bruto global
- iii) Minimizar la mano de obra utilizada.

Sujetos a dos tipos de restricciones:

i) Una restricción que considera el factor tierra en el sentido de -- que dicho input no es limitado, por lo tanto existe una restricción donde se limita la superficie total de la solución a la existente en la actualidad, y una serie de restricciones donde lo que se pretende es recoger los hábitos de rotación de cultivos seguidos por los agricultores de la zona.

ii) Una restricción que considera el factor rendimiento, ya que el efecto primordial de la sal en el agua de riego supone una caída de los rendimientos de los distintos cultivos. Además la introducción de este tipo de restricciones va a tener otra finalidad que va a ser la acotación de la superficie ocupada por cada cultivo.

Los datos requeridos para la construcción del modelo son:

- a) Identificación de los cultivos más importantes de la zona.
- b) Determinación de las necesidades de agua para cada cultivo.
- c) Rendimientos obtenidos por cada cultivo.

d) Obtención del margen bruto de cada cultivo para lo cual es necesario conocer el precio de la cosecha, así como los costes variables de la misma.

e) Superficie total cultivada en la zona.

f) Disponibilidades de agua para el riego en la zona.

g) Cálculo de la producción de cada cultivo.

h) Necesidades de mano de obra para cada cultivo.

i) Disponibilidades de mano de obra en la zona.

3. Datos seleccionados

3.1. Cultivos más importantes de la zona

Para la obtención de los cultivos de la zona se ha acudido a las encuestas-base para la elaboración de los anuarios de Estadística Agraria - publicados por el Ministerio de Agricultura. Estas encuestas son realizadas en cada municipio con el fin de obtener información, entre otras cosas, de la superficie dedicada a cada cultivo por término municipal.

Se tomaron las encuestas realizadas en los siete municipios regados por las acequias del Urdán y Rabal para los años 1980, 1981 y 1982. Se sumaron las superficies dedicadas a cada cultivo, teniendo en cuenta que algunos municipios eran regados por otras acequias o ríos, tal como se recoge en el Plan Hidrológico Nacional (INITEC, 1981). Así, en Nuez de Ebro sólo el 85,6% de la superficie en regadío era regada con agua de las acequias mencionadas; en Villafranca de Ebro, el 35,9% y en Zaragoza, el 48,1%. Posteriormente se calculó la media de los 3 años para reducir las variaciones que pudiese haber de un año a otro, por razones climáticas o por factores económicos, sobre todo en aquellos cultivos que rotan entre sí (por ejemplo, un año puede que casi todos los agricultores cultiven maíz porque el precio es alto o porque el año anterior hubo una plaga que perjudicó a algún cereal). En definitiva se trata de dar una visión más estable de la superficie dedicada a cada cultivo.

Los resultados obtenidos vienen recogidos en el Anejo I. Ahora bien, trabajar con casi 80 cultivos es totalmente inoperante sobre todo cuando la mayor parte ocupan una superficie inferior a 10 ha. Por ello se han escogido únicamente 14 que vienen a representar alrededor del 96% de la superficie total cultivada (Cuadro 3).

Cuadro 3. Superficie media de riego ocupada por los principales cultivos de la zona.

Cultivo	Superficie media (ha)
Trigo	3.972
Cebada	795
Maíz	4.375
Alfalfa	3.582
Manzano	115
Peral	158
Melocotonero	217
Albaricoquero	68
Patata (*)	93
Espárrago	17
Lechuga	36
Tomate	84
Cebolla	48
Alcachofa	62

(*) Se incluyen las ha de patata temprana, media estación y tardía.

Fuente: Elaboración propia.

Si se comparan estas cifras con las del Anejo I se aprecia que no coinciden las que aparecen en los productos hortícolas (espárrago, lechuga, tomate, cebolla y alcachofa), ya que dada la gran variedad de cultivos hortícolas existentes con pequeñas superficies y la gran importancia de estos cultivos, por tener márgenes brutos elevados, parece conveniente introducir en el modelo la superficie total dedicada a horticultura. Por ello, se han escogido los cinco cultivos hortícolas más importantes y se ha sumado su superficie, calculándose la participación de cada cultivo en términos porcentuales. La superficie hortícola anual cultivada se ha repartido entre los cinco cultivos, manteniendo la participación calculada anteriormente.



Por último, cabe mencionar dentro de este apartado las costumbres que suelen seguir los agricultores en cuanto a la rotación de cultivos. Para ello se ha contrastado con la opinión de varios expertos dentro -- del Servicio de Investigación Agraria de la D.G.A. Los resultados obtenidos pueden resumirse en los siguientes puntos:

i) La rotación en cereales suele ser: Trigo-Maíz, Trigo-Cebada y Maíz-Cebada. Es decir, estos tres cultivos compiten por la misma superficie.

ii) En el caso de la alfalfa, el desgaste del suelo que se produce hace que no sea recomendable mantener este cultivo más de 4 años en una determinada parcela.

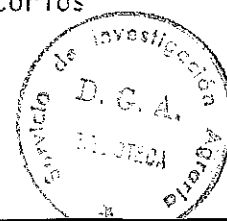
iii) Los productos hortícolas compiten entre sí ya que no puede dedicarse una parcela determinada más de un año a un mismo cultivo. Es decir cada año rotan los cultivos hortícolas entre sí.

iv) En plantaciones de frutales no puede hablarse de rotaciones puesto que la vida media de un árbol oscila entre 13 y 20 años según la especie, y después la tierra se dedica a cereales o maíz, puesto que es necesario que transcurran de 10 a 15 años hasta que se puedan volver a plantar frutales debido al desgaste de la tierra.

3.2. Determinación de las necesidades de agua para cada cultivo

La determinación de las necesidades teóricas de agua para unos - determinados cultivos parte del análisis de la evapotranspiración de los mismos.

La evapotranspiración comprende la evaporación del suelo y la transpiración vegetal. En el término evaporación se incluye también la evaporación de las gotas de lluvia y rocío, en la superficie libre de las plantas, así como la del agua en superficies líquidas libres. La medición directa de la evapotranspiración puede realizarse por medio de evapotranspirómetros o lisímetros, utilizando un cultivo de referencia que suelen ser gramíneas y que permite la lectura día a día de las pérdidas de agua por evapotranspiración. El coste de estos aparatos reduce el número de observatorios



o estaciones agrícolas que disponen de ellos y concretamente hasta el año -- 1982 no se disponía de ninguno por parte de Organismos Oficiales en el Valle del Ebro, lo que obliga a recurrir a métodos teóricos a la hora de establecer los valores mensuales de la evapotranspiración, con el consiguiente riesgo de errores y la necesaria contrastación con los datos de consumos disponibles.

Calculada la evapotranspiración para un cultivo de referencia -- (ET_o), se toman a continuación los valores de los coeficientes de cultivo -- (K_c), que permiten relacionar la evapotranspiración de cada cultivo con el utilizado como referencia. Multiplicando los valores de ET_o por estos coeficientes K_c se obtienen los valores de la evapotranspiración de los cultivos (ET).

Las necesidades netas de agua de riego quedan determinadas por -- la ET menos el agua efectiva que aportan las precipitaciones, las aguas subterráneas y la acumulación de agua en el suelo debido a anteriores precipitaciones o aportaciones de agua superficiales y subterráneas.

Estas necesidades netas hay que incrementarlas en los porcentajes correspondientes de pérdidas por escorrentía superficial, percolación y déficits de gestión y explotación, para llegar a las necesidades brutas a nivel parcela.

La relación necesidades netas a necesidades brutas es la eficiencia de riego. Esta eficiencia es bastante difícil de estimar. Además estas eficiencias tienen una cierta variación a lo largo de la temporada de -- riego dado que se aprecian eficiencias mayores durante los períodos de necesidades máximas; las eficiencias varían también según el método de riego -- siendo sensiblemente más bajas para el método de riego por gravedad que para el de aspersión y las de éste a su vez inferiores respecto al de riego por goteo. Asimismo las eficiencias durante los primeros años de la transformación en regadío son inferiores a aquellas que sirvieron de base para el cálculo del proyecto de transformación.

Se ha considerado apropiado una eficiencia en riego del 75% para cereales, maíz y alfalfa, y del 65% para frutales y hortícolas.

Los cálculos de las necesidades de agua para cada cultivo vienen recogidas en el Anejo II y el cuadro 4.

Cuadro 4. Necesidades mensuales de agua de los principales cultivos (m³/ha)

Mes	Cultivo						
	Trigo	Cebada	Maíz	Alfalfa	Patata	Huerta	Frutales
Enero							
Febrero							
Marzo	224	224		884	182	61	
Abril	1.576	1.576	226	1.317	835	608	531
Mayo	2.007	2.007	522	1.626	1.698	1.042	1.042
Junio	709	709	1.704	1.474	2.912	2.781	1.888
Julio			3.036	2.501	3.553	3.502	2.886
Agosto			2.569	2.120	2.524	2.964	2.446
Septiembre			1.161	1.161		1.174	1.252
Octubre			378	594		328	382
Noviembre				206			
Diciembre							

Fuente: INITEC (1981). Plan Hidrológico Nacional y elaboración propia.

3.3. Cálculo del rendimiento obtenido por los cultivos

El término rendimiento viene medido en kg producidos por ha de cultivo. Las estadísticas sobre rendimientos no son muy numerosas. En principio se dispuso del Anuario de Estadística Agraria cuyos datos no son reales en su totalidad en el sentido de que únicamente recogen medias provinciales. Sin embargo, a falta de estadísticas concretas sobre la zona objeto de estudio, parece conveniente utilizar estos datos como base, pues siempre serán mejores a los que pueden provenir de otras provincias y Comunidades Autónomas. Se contrastaron los datos con expertos del Servicio de Extensión Agraria y de UTECO, corrigiéndose las cifras para frutales y cereales.

Los datos han sido recogidos para tres años (1980, 1981 y 1982) y se han obtenido los rendimientos medios tal como se había hecho con las superficies. Los datos obtenidos se recogen en el cuadro 5.

Cuadro 5. Rendimientos de los principales cultivos de la zona (kg/ha)

Cultivo	1980	1981	1982	Media
Trigo	5.224	4.432	4.617	4.758
Cebada	4.985	3.305	4.894	4.394
Maíz	8.013	6.743	6.873	7.210
Alfalfa (*)	14.400	14.700	14.700	14.600
Manzano	14.050	25.491	21.475	20.338
Peral	6.184	16.281	13.396	11.954
Melocotonero	5.029	12.573	10.058	9.220
Albaricoquero	4.146	17.270	16.721	12.712
Patata	17.195	17.694	16.733	17.207
Espárrago	4.000	3.800	3.700	3.833
Lechuga	17.000	17.500	17.500	17.833
Tomate	30.000	33.499	33.500	32.333
Cebolla	34.999	35.000	34.999	34.999
Alcachofa	8.000	9.000	9.000	8.667

(*) kg de heno.

Fuente: Anuario de Estadística Agraria, UTECO, SEA.

3.4. Obtención de los márgenes brutos de los diferentes cultivos

El margen bruto ha sido calculado mediante la diferencia entre los ingresos y costes proporcionales.

El ingreso viene definido por el producto de los rendimientos -- por el precio, considerando el rendimiento medio y los precios de 1982.

Los costes proporcionales incluyen: semillas, abonos, fertilizantes, tratamientos fitosanitarios y mano de obra. No se han considerado -- los costes de maquinaria puesto que los agricultores suelen utilizar la misma maquinaria para distintos cultivos, dentro de una misma finca, y es difícil determinar qué parte del costo de la maquinaria ha sido aplicada a cada explotación.

El cuadro 6 recoge el resumen de los cálculos realizados para la obtención de los márgenes brutos de los diferentes cultivos y los precios es tán recogidos en en Anejo III. Los costes proporcionales de los cultivos vie nen en el Anejo IV.

Cuadro 6. Valores de los principales parámetros usados para el cálculo de los márgenes brutos

Cultivo	Rendimiento (kg/ha)	Precio (pta/kg)	Ingreso (pta/ha)	Coste (pta/ha)	Margen bruto (pta/ha)
Trigo	4.758	20,3	96.587	39.121	57.466
Cebada	4.394	16,5	72.501	33.672	38.829
Maíz	7.210	20,3	146.363	59.860	86.503
Alfalfa	14.600	10,1	147.460	65.696	81.764
Manzano	20.338	21,75	442.351	158.958	283.393
Peral	11.954	35,5	424.367	196.867	227.500
Melocotonero	9.220	50,65	466.993	141.330	325.663
Albaricoquero	12.712	26,11	331.910	128.809	203.101
Patata	17.207	12,0	206.484	175.054	31.430
Espárrago	3.833	180,0	689.940	367.213	322.727
Lechuga	17.333	18,24	316.154	186.161	129.993
Tomate	32.333	8,50	274.030	210.845	63.185
Cebolla	35.000	7,0	245.000	188.586	56.414
Alcachofa	8.667	18,0	156.006	110.125	45.881
Zuecas	30.827	10,0	308.270	162.489	145.781

Fuentes: Caverro y Delgado (1984), UTECO., SEA y elaboración propia.

3.5. Superficie total cultivada en la zona

La superficie de regadío cultivada en la zona asciende a 14.183 ha considerado como la superficie media cultivada de los años 1980, 1981 y 1982 tal como viene recogido en el Anejo I.

3.6. Disponibilidades de agua de riego en la zona

Las disponibilidades de agua para riego no son ilimitadas. El agua es un recurso limitado y objeto de regulación por parte de la Confederación Hidrográfica del Ebro. El agua disponible en la zona vendrá determinado por el caudal de las dos acequias (haciendo el supuesto que el agua de dichas acequias se destina exclusivamente al riego). El Sindicato de Riegos de las acequias de Urdán y Rabal proporcionó datos sobre el caudal de la acequia de Urdán desglosado en meses para 1980, 1981 y 1982. Asimismo proporcionó información sobre las dotaciones para cada acequia: $6,6 \text{ m}^3/\text{sg}$ para Urdán y $4,1 \text{ m}^3/\text{sg}$ para Rabal.

El cálculo del caudal mensual de la acequia de Rabal se ha obtenido tomando la distribución mensual del caudal de Urdán

Las disponibilidades medias de agua desglosadas en meses se reflejan en el cuadro 7.

3.7. Cálculo de la producción de cada cultivo

La producción viene definida por el producto de la superficie -- por el rendimiento. Se han calculado a efectos del estudio las producciones de los diferentes cultivos para 1980, 1981 y 1982. Los resultados vienen recogidos en el cuadro 8.

3.8. Necesidades de mano de obra para cada cultivo

La mano de obra necesaria para cada cultivo viene determinada -- por el número de horas de trabajo por ha y no por el número de personas que trabajan por ha. La razón de esta elección estriba en el hecho de que, en la mayor parte de los estudios realizados, se expresan horas de trabajo por ha. Además es muy difícil determinar cuántos agricultores son necesarios para cubrir esas horas, ya que, como es sabido, no puede afirmarse que la jornada de un agricultor sea de 8 horas, sino que es variable según la época del año en que se encuentre.

Cuadro 7. Disponibilidades medias de agua en las acequias Urdán y Rabal

Mes	Caudal (miles de m ³ /sg)		
	Urdán	Rabal	Total
Enero	14.070	8.723	22.793
Febrero (*)	1.526	946	2.472
Marzo	8.697	5.392	14.089
Abril	15.321	9.499	24.820
Mayo	15.543	9.637	25.180
Junio	15.807	9.800	25.607
Julio	14.864	9.216	24.080
Agosto	12.866	7.977	20.843
Septiembre	11.135	6.904	18.039
Octubre	8.658	5.368	14.026
Noviembre	8.856	5.491	14.347
Diciembre	10.219	6.336	16.555

(*) En Febrero suele cortarse el agua para hacer limpieza de la acequia.

Fuente: Sindicato de Riegos de Urdán y Rabal, y elaboración propia.

Los estudios sobre este tema no son muy frecuentes, y raramente se publican puesto que varían con el paso de los años (introducción de nuevas variedades y de cultivos, aparición de nuevas tecnologías, etc). Las fuentes estadísticas utilizadas han sido documentos de uso interno existentes en el Servicio de Investigación Agraria de la DGA y opiniones de expertos del Servicio de Extensión Agraria. Los datos obtenidos vienen recogidos en el cuadro 9.

3.9. Disponibilidades de mano de obra en la zona

La disponibilidad de mano de obra en la zona no es una limitación importante. Según se recoge en Renta Municipal de Aragón de 1981 publicado por la CAZAR son unas 2.000 personas las que se dedican al sector agrícola en esta zona, con lo que su potencial en horas de trabajo cubre totalmente las necesidades de mano de obra de los diferentes cultivos.

Cuadro 8. Superficies, rendimientos y producciones de los principales cultivos de la zona.

	1980		1981		1982				
	Superficie (ha)	Rendimiento (kg/ha)	Superficie (ha)	Rendimiento (kg/ha)	Superficie (ha)	Rendimiento (kg/ha)			
Trigo	4.046	5.224	21.139	3.847	4.432	17.053	4.024	4.617	18.578
Cebada	755	4.985	3.764	786	3.305	2.599	843	4.844	4.129
Maíz	4.373	8.013	35.039	4.592	6.743	30.963	4.161	6.873	28.603
Alfalfa	3.564	14.400	51.335	3.395	14.700	49.912	3.786	14.700	55.667
Manzano	115	14.050	1.624	116	25.491	2.959	115	21.475	2.471
Peral	159	6.184	986	159	16.281	2.597	157	13.396	2.109
Melocotonero	217	5.029	1.091	2.204	12.573	2.771	215	10.058	2.163
Albaricoquero	68	4.146	283	68	17.270	1.181	68	16.721	1.143
Patata	88	17.195	1.513	95	17.694	1.686	96	16.733	1.612
Espárrago	12	4.000	51	20	3.800	77	19	3.700	71
Lechuga	45	17.000	766	14	17.500	257	48	17.500	849
Tomate	77	30.000	2.326	88	33.499	2.962	88	33.500	2.974
Cebolla	30	34.999	1.074	34	35.000	1.224	80	34.999	2.820
Alcachofa	73	8.000	586	92	9.000	828	22	9.000	205

Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Estadísticas de ocupación de superficie a nivel municipal (I T).

Cuadro 9. Necesidades de mano de obra de los principales cultivos (horas/ha)

Cultivo	Mano de obra (horas/ha)
Trigo	36
Cebada	32
Maíz	69
Alfalfa	116
Manzano	514
Peral	662
Melocotonero	424
Albaricoquero	421
Patata	343
Espárrago	1.145
Lechuga	667
Tomate	795
Cebolla	632
Alcachofa	883

Fuente: Caverro y Delgado (1984), Puig y Casado (1984) y SEA.

4. Modelo empleado

El modelo queda especificado de la siguiente forma:

Minimizar lexicográficamente:

$$a : \{(\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4 + \rho_5 + \rho_6 + \rho_7 + \rho_8 + \rho_9), (\eta_{10}), (\rho_{11})\}$$

$$\text{Sujeto a: } Q_1 : \sum_{i=1}^{14} N_{ij} X_i + \eta_j - \rho_j = D_j \quad j = 1, 2, \dots, 9 \quad (1)$$

$$Q_2 : \sum_{i=1}^{14} mb_i X_i + \eta_{10} - \rho_{10} = MB \quad (2)$$

$$Q_3 : \sum_{i=1}^{14} mo_i X_i + \eta_{11} - \rho_{11} = MO \quad (3)$$

$$P_{\min_i} \leq \bar{R}_i X_i \leq P_{\max_i} \quad i = 1, \dots, 14 \quad (4)$$

$$X_4 \leq 0,30 \sum_{i=1}^4 X_{\max_i} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^3 X_{\min_i} \leq \sum_{i=1}^3 X_i \leq \sum_{i=1}^3 X_{\max_i} \quad (6)$$

$$\sum_{i=10}^{14} X_{\min_i} \leq \sum_{i=10}^{14} X_i \leq \sum_{i=10}^{14} X_{\max_i} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{14} X_i < S \quad (8)$$

$$X_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, 14 \quad (9)$$

donde:

i = indica el cultivo (1 = trigo, 2 = cebada, 3 = maíz, 4 = alfalfa, 5 = manzano, 6 = peral, 7 = melocotonero, 8 = albaricquero, 9 = patata, 10 = espárrago, 11 = lechuga, 12 = tomate, 13 = cebolla, 14 = alcachofa).

j = Indica el mes (1 = Marzo, 2 = Abril, ... 9 = Noviembre)

N_{ij} = Necesidad de agua del cultivo i en el mes j

X_i = Superficie del cultivo i (incógnita)

mb_i = Margen bruto del cultivo i

D_j = Disponibilidad de agua en el mes j

MB = Margen Bruto global = $\sum_{i=1}^{14} \text{superficie media}_i \times mb_i$

mo_i = necesidad de mano de obra del cultivo i

MO = disponibilidad total de mano de obra

P_{\min} = Producción mínima del cultivo i

P_{\max} = Producción máxima del cultivo i

R_i = Rendimiento medio del cultivo i

X_{\min} = Superficie mínima del cultivo i

X_{\max} = Superficie máxima del cultivo i

S = Superficie media total

A la vista del modelo es necesario hacer las siguientes matizaciones:

i) En principio el modelo está diseñado para tratar de reflejar lo más exactamente posible la realidad de la zona en términos de superficie ocupada por cada uno de los cultivos.

ii) En esta primera fase del estudio el margen bruto total (MB) que -- aparece en la expresión (2) ha sido calculado multiplicando las superficies -- medias existentes por los correspondientes márgenes brutos unitarios de cada cultivo (1.370 millones pta).

Al igual que en el caso anterior la expresión (3) ha sido calculada multiplicando las superficies medias existentes por las correspondientes necesidades unitarias de mano de obra de cada cultivo, sumando los resultados e incrementando el resultado final en un 15 % con lo que se pretende recoger la ausencia de limitación real en este aspecto (1,5 millones de hectáreas).

iv) La expresión (4) trata de acotar la solución entre los límites -- reales existentes. Podría haberse planteado este conjunto de restricciones -- acotando la superficie de cada cultivo entre la superficie máxima y mínima registrada en los tres años del estudio. Sin embargo, lo que se trata al expresararlo de esta forma es, ampliar un poco el intervalo o espacio de soluciones y facilitar el análisis de sensibilidad posterior. Puesto que, como ya se ha mencionado reiteradamente, el efecto más evidente de la salinidad es un -- descenso de los rendimientos de los diferentes cultivos.

v) La restricción (5) no es más que la expresión analítica del hecho físico de que la alfalfa no puede estar más de 3 ó 4 años en la misma parcela, teniendo entonces que rotar con trigo, maíz y cebada. De ahí que la superficie dedicada a la alfalfa no puede ser aproximadamente mayor del 30% de la superficie (se ha considerado conveniente tomar la superficie máxima) dedicada a trigo, cebada, maíz y alfalfa.

vi) Las restricciones (6) y (7) recogen las rotaciones cereales-maíz y productos hortícolas entre sí, respectivamente. La forma de representarlos -- matemáticamente da una idea de que dichos cultivos compiten por la misma superficie.

vii) Se ha considerado como objetivo prioritario minimizar el agua -- utilizada puesto que en principio el agua disponible no es ilimitada y además es objeto de regulación. El segundo objetivo será maximizar el margen bruto --

total y el tercer objetivo será minimizar la mano de obra disponible puesto - que, como se ha dicho anteriormente, es la limitación menos importante en esta zona.

Existen varios algoritmos para resolver los modelos de programación -- por objetivos. El método elegido es el que se denomina "método lineal secuencial" que consiste en aplicar el Simplex pero en un modo interactivo (Rae, 1974; Daver y Krueger, 1977) para resolver una secuencia de problemas de programación lineal.

Normalmente (Ignizio, 1982) lo que se suele hacer es dar a las restricciones una prioridad absoluta y resolver un problema donde sólo se incluyen dichas restricciones. Los resultados obtenidos son incluidos en el modelo para optimizar el o los objetivos a los que se ha asignado una prioridad 1.- Los resultados son incluidos de nuevo en el modelo optimizando a continuación los objetivos de prioridad 2 y así sucesivamente. El proceso continúa hasta - que la solución resultante contiene alguna variable de desviación no nula. En este caso habremos llegado a un vector de desviaciones con $r-1$ componentes - nulos y la r -ésima distinta de cero, pero de valor mínimo entre todas las so luciones posibles. Por tanto no tiene sentido continuar introduciendo los resultados en el modelo y optimizando puesto que en un proceso de minimación -- lexicográfica los $r+n$ componentes del vector carecen de importancia, tomándose por tanto en consideración solamente el primer elemento del vector no nu lo. En esta situación se habrá llegado, por tanto, a la solución óptima.

A la vista del problema objeto de estudio se ha considerado más conveniente únicamente establecer tres prioridades y no conceder una prioridad absoluta a las restricciones, sino que serán introducidas, sin incluir variables de desviación, en el modelo con el único objetivo de acotar la solución. La consideración de las restricciones de tierra y rendimientos como una prioridad absoluta, dado que no son excesivamente limitantes, daría lugar a variables de desviación no nulas con lo que se habría alcanzado una solución óp tima que podría no satisfacer las disponibilidades existentes de agua. Por - otro lado si no se introdujeran las restricciones en la primera prioridad podría ocurrir que la solución (en términos de superficie ocupada por cada cultivo) adoptara valores extremos, alcanzando valores muy altos para algunas

variables y valores nulos para el resto con lo que no se conseguiría el objetivo fundamental del modelo que no es otro que el de representar la realidad existente. De ahí que se hayan considerado solamente tres prioridades.

Centrándonos en nuestro modelo el primer problema a resolver será:

$$\text{min. lex. } a = \sum_{i=1}^9 \rho_i \quad (9)$$

$$\text{s. a. } \sum_{i=1}^{14} N_{ij} X_i + n_j - \rho_j = D_j \quad j = 1, \dots, 9 \quad (10)$$

$$P_{\min_i} \leq \bar{R}_i X_i \leq P_{\max_i} \quad i = 1, \dots, 14 \quad (11)$$

$$X_4 \leq 0,30 \sum_{i=1}^4 X_{\max_i} \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^3 X_{\min_i} \leq \sum_{i=1}^3 X_i < \sum_{i=1}^3 X_{\max_i} \quad (13)$$

$$\sum_{i=10}^{14} X_{\min_i} \leq \sum_{i=10}^{14} X_i \leq \sum_{i=10}^{14} X_{\max_i} \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{14} X_i \leq S \quad (15)$$

$$X_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, 14 \quad (16)$$

Si la solución es $\rho_i = 0$ ($i = 1 \dots 9$), el siguiente paso será resolver el modelo entero formado por las expresiones (1) a (8) dando a todos los ρ_i ($i = 1 \dots 9$) valores nulos. El vector de desviaciones será en este caso:

$$a = n_{10}$$

Si en la solución hay algún ρ_i no nulo se habrá alcanzado la solución óptima. Se decidió utilizar el Minos 5.0 programa diseñado por Murtgh y Saunders (1983) en la Universidad de Stanford (California).

Minos 5.0 es un programa básicamente diseñado para resolver problemas no lineales, considerando por tanto el problema lineal como un caso particular.



5. Resultados

La resolución del primer problema (expresiones (9) a (16)) da como resultado valores nulos para todas las variables p_i que se querían minimizar. Se pasó a continuación a resolver el segundo modelo (min. lex. a = n_{10}) dando precisamente a las variables p_i un valor nulo y como margen bruto global la cifra de 1.115 millones de pta que es precisamente el que se obtiene actualmente en la zona.

Los resultados de este segundo problema da como resultado $n_{10} = 0$. Por tanto hay que pasar la tercera y última fase: resolver el modelo entero dando valores nulos a todas las variedades de desviación minimizadas anteriormente y como disponibilidad global de mano de obra la cifra de 1,5 millones de horas.

En el cuadro 10 se recogen los resultados en términos de superficies ocupadas por cada cultivo, derivadas del análisis empírico y se comparan con la situación existente en la actualidad.

Cuadro 10. Superficies por cultivos (ha)

	Situación actual	Solución actual	% desviación
Trigo	3.972	4.443	11,8 %
Cebada	795	591	-25,6 %
Maíz	4.375	3.969	-10,2 %
Alfalfa	3.582	3.812	6,4 %
Manzano	115	79	-44,8 %
Peral	157	155	1,2 %
Melocotonero	217	300	38,2 %
Albaricoquero	68	22	-206,7 %
Patata	93	87	6,3 %
Espárrago	17	20	15,4 %
Lechuga	36	14	-143,1 %
Tomate	84	71	-18,0 %
Cebolla	48	30	-37,5 %
Alcachofa	62	23	-62,9 %
T O T A L	13.628	13.625	0,0 %

Los resultados, podrían parecer no muy buenos, sobre todo en un análisis cultivo por cultivo, ya que un modelo con una desviación mayor del 100% en algún cultivo no parece ser muy preciso. Sin embargo si hacemos un análisis global y tenemos en cuenta la forma de las restricciones y las propias limitaciones del modelo, podemos llegar a conclusiones muy diferentes.

En efecto, en primer lugar hay que hacer constar que el margen bruto total resultante es igual al existente actualmente (por tanto $n_{10} = p_{10} = 0$). Esta cifra es alcanzada con 13.628 ha actualmente que es precisamente la cifra recogida en la solución. Las horas de mano de obra necesarias para alcanzar este margen bruto es inferior a la disponibilidad real (1,3 millones). Por tanto a nivel global el modelo recoge satisfactoriamente la realidad.

Podríamos preguntarnos ¿por qué existen desviaciones tan considerables en un análisis individual cultivo por cultivo?. La respuesta es que lo se pretende al utilizar la programación por metas es representar la realidad, pero implícitamente supone un proceso de optimización. Es decir, en realidad lo que se está calculando es una solución óptima, por lo que los valores de las variables normalmente tenderán a alcanzar valores extremos del espacio posible de soluciones. Un caso evidente son los frutales. Hemos barajado la hipótesis de que las necesidades de agua son idénticas para todos los frutales. Por tanto, lo lógico será que en un proceso de optimización el melocotón que tiene el margen bruto unitario más elevado alcance una superficie próxima al valor superior y el albaricoque, que tiene el menor margen bruto, ocupe superficies mínimas (incluso serían nulas si la solución no estuviese acotada). Globalmente considerada las superficies real y estimada dedicadas a frutales no difieren en más de un 0,2 %.

El razonamiento es análogo para el caso de las hortalizas, puesto que como en el caso anterior se han considerado necesidades de agua idénticas para todos los cultivos. Por tanto, el espárrago, que tiene un margen bruto unitario mayor, ocupa la totalidad de la superficie disponible para dicho cultivo, lechuga, tomate, cebolla y alcachofa que tienen los menores márgenes, ocupan la superficie mínima.



Considerando globalmente los cultivos hortícolas, la superficie total cultivada realmente es 90 ha mayor a la que proporciona la solución (cerca -- del 35 %). Esta desviación se debe a que los productos hortícolas requieren más agua que los frutales y cereales. Además, los márgenes brutos son menores que los de los frutales y, en algunos casos, que los del trigo, maíz y alfalfa, por lo que la solución primará a estos últimos cultivos en detrimento de los hortícolas.

En cuanto a cereales, maíz y alfalfa, el razonamiento ya no se puede circunscribir al tema margen bruto, sino que debe hacerse otorgando prioridad al tema agua. Se pueden establecer dos grupos: 1) los cereales (trigo, cebada) y 2) maíz y alfalfa. Las necesidades de agua de riego de los cereales es muy inferior a los de maíz y alfalfa y, dado que se ha adoptado como prioridad básica minimizar el agua necesaria para riego, es lógico pensar que, en un proceso de optimización, los cereales alcanzarán valores próximos a los extremos superiores, como así sucede. Entre maíz y alfalfa, el segundo cultivo siempre será preferido al primero (aunque en la realidad no ocurra así) debido a que, aunque globalmente la alfalfa necesita más agua, en los meses donde el agua es más escasa y más necesaria (Julio y Agosto), las necesidades de riego del maíz son superiores. Por tanto, como el factor margen bruto no tiene un carácter diferenciador para estos dos cultivos (87.000 pta/ha para el maíz y 82.000 pta/ha para la alfalfa), la escasez de agua determina que la alfalfa sea predominante sobre el maíz.

La solución obtenida proporciona, como ya se ha dicho antes, un margen bruto de 1.115 millones de pta. Los cultivos preferidos son: cereales, maíz y alfalfa, mientras que la superficie dedicada a huerta no alcanza el 2% de la superficie total. El agua es un recurso escaso y limitante en la época más seca (Julio) donde la totalidad del agua disponible es necesaria para regar, ya que en este mes el caudal es bajo y además es el mes en el que las plantas necesitan mayores dosis de agua para desarrollarse. En el resto de los meses no existen restricciones de agua.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que el modelo, en gran medida describe fielmente la realidad y por tanto puede ser utilizado para tratar de analizar diferentes situaciones hipotéticas (actuales o futuras) que pueden plantearse y que es precisamente lo que va a ocupar el resto del estudio.

6. Efecto de la salinidad sobre los rendimientos de los cultivos

La salinidad no es un fenómeno actual. Numerosos factores, entre los que no debe olvidarse la actividad humana, han contribuido durante años en este proceso. Sin embargo, hasta hace relativamente pocos años no se era consciente del mismo, quizá debido a que hasta entonces los niveles de salinidad no eran preocupantes o no se habían estudiado bien sus efectos.

No se puede considerar, por tanto, que el problema salino arranque en nuestros días, sino que es un proceso que se ha ido gestando y actualmente ya se están produciendo pérdidas.

Las estadísticas que existen actualmente sobre rendimientos de los distintos cultivos están considerando implícitamente el efecto salino. Habría -- que calcular cuáles serían los rendimientos si no existiese el problema de la salinidad.

Se ha demostrado empíricamente que el rendimiento de los cultivos no decrece significativamente hasta que la conductividad eléctrica (CE) excede de un valor específico para cada cultivo. Este valor es conocido como el umbral de salinidad para cada cultivo. Los primeros datos sobre la tolerancia de los cultivos a la sal fueron publicados por el U.S Salinity Laboratory -- Staff (1954). Posteriormente, numerosos investigadores se han preocupado de ampliar el número de especies de este primer estudio (Bernstein et al., 1974). Las listas más recientes sobre tolerancia salina no solamente incluyen el umbral de salinidad sin también los porcentajes de descenso de los rendimientos debidos a incrementos de la CE por encima de este valor umbral.

Sin embargo, la mayor parte de las tablas publicadas toman como medida de salinidad la CE del extracto saturado del suelo (CEe), que es la medida -- tradicionalmente utilizada; pero en nuestro caso no nos interesa dicha medida, puesto que lo que estamos analizando es la salinidad del agua de riego, por lo que interesa más conocer cuál es la CE del agua de riego.

La FAO (1976) publicó unas tablas en las que se recogía las reducciones de rendimientos previstas de 0,10, 25 y 50%, debido a los efectos tanto del incremento de la salinidad del suelo (CEe) como del incremento en la salinidad del agua de riego (CEw), asumiendo la siguiente relación:

$$CEw \times 1,5 = CEe$$

Los datos correspondientes a los cultivos objeto de estudio se recogen en el cuadro 11.

Estas tablas han sido elaboradas mediante la siguiente fórmula (Maas y Hoffman, 1977):

$$Y = 100 - b (CEe - a)$$

donde: Y = rendimiento relativo de los cultivos en %

CEe = salinidad del extracto saturado del suelo (mmho/cm)

a = umbral de salinidad

b = descenso del rendimiento debido al incremento de la salinidad en 1 unidad por encima del valor umbral.

Por tanto, para estos autores cada incremento en la salinidad del suelo por encima del umbral causará un descenso en los rendimientos proporcional a dicho incremento.

El valor máximo de salinidad para el cual el descenso en los rendimientos sería del 100%, se ha calculado mediante extrapolación de los valores necesarios para producir descensos del 10, 25 y 50%, tal como se recoge en la figura 1.

Cuadro 11. Disminución de rendimientos (%) según los niveles de salinidad

	0 %		10 %		25 %		50 %		Máximo
	CEe	CEw	CEe	CEw	CEe	CEw	CEe	CEw	CEe
Trigo	6,0	4,0	1,4	4,9	9,5	6,5	13,0	8,7	20,0
Cebada	8,0	5,3	10,0	6,7	13,0	8,7	18,0	12,0	28,0
Maíz	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10,0
Alfalfa	2,0	1,3	3,4	2,2	5,4	3,6	8,8	5,9	15,5
Manzano	1,7	1,0	2,3	1,6	3,3	2,2	4,8	3,2	8,0
Peral	1,7	1,0	2,3	1,6	3,3	2,2	4,8	3,2	8,0
Melocotonero	1,7	1,1	2,2	1,4	2,9	1,9	4,1	2,7	6,5
Albaricoquero	1,6	1,1	2,0	1,3	2,6	1,8	3,7	2,5	6,0
Patata	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10,0
Espárrago (1)	-	3,5	-	-	-	-	-	-	-
Lechuga	1,3	0,9	2,1	1,4	3,2	2,1	5,2	3,4	9,0
Tomate	2,5	1,7	3,5	2,3	5,0	3,4	7,6	5,0	12,5
Cebolla	1,2	0,8	1,8	1,2	2,8	1,8	4,3	2,9	7,5
Alcachofa (2)	2,5	1,7	3,5	2,3	5,0	3,4	7,6	5,0	12,5

(1) Sólo se dispone de datos sobre: - umbral de salinidad: 3,5 mmho/cm
- descenso de rendimiento debido a un incremento de 1 mmho/cm: 1,9 %

(2) No se disponen de datos, aunque el Departamento de Suelos y Riegos del SIA (DGA) ha estimado que pueden asimilarse al tomate.

El cálculo de los rendimientos actuales sin salinidad se ha realizado de la siguiente forma:

i) Se ha tomado como punto de partida los rendimientos existentes -- (1980, 1981 y 1982).

ii) Se ha calculado la salinidad media en dichos años, que en 1980 era de 2,25 mmho/cm, en 1981 de 2,4 mmho/cm y en 1982 de 1,675 mmho/cm para la acequia Urdán, siendo por tanto la salinidad media de los tres años de 2,1 mmho/cm (Cuadro 12). Dado que la acequia Rabal deriva sus aguas del mismo tramo del río Gállego, se ha asumido que su CEw es similar a la de la acequia Urdán.

Cuadro 12. Salinidad (CEw, mmho/cm) de la acequia Urdán en 1980, 1981 y 1982

	1980	1981	1982
Enero	1,9	2,1	0,7
Febrero	2,1	2,9	0,7
Marzo	2,2	2,6	1,0
Abril	1,6	2,5	1,7
Mayo	2,0	2,6	1,8
Junio	2,1	2,0	2,1
Julio	2,1	2,3	2,1
Agosto	2,5	2,2	2,6
Septiembre	2,7	2,9	2,1
Octubre	2,7	3,0	2,8
Noviembre	2,7	2,9	1,8
Diciembre	2,3	0,7	0,7
Media	2,25	2,4	1,675

Fuente: Departamento de Suelos y Riegos del Servicio de Investigación Agraria (DGA)

iii) Conocida la salinidad media y tomando como referencia el cuadro 11, se ha calculado en términos porcentuales el rendimiento correspondiente a los diferentes niveles de salinidad. Los resultados vienen expresados en el cuadro 13.

Los datos de este cuadro significan que, por ejemplo, el rendimiento del maíz en 1982 era sólo el 90,4% del que se obtendría si no estuviese afectado por la sal. Por tanto bastaría con multiplicar por 1.106 el rendimiento de 1982 para obtener el rendimiento actual sin tener en cuenta el efecto salino. Así pues, a partir de i) y de este último cuadro se ha obtenido el cuadro 14. La última columna no ha sido calculada como media aritmética de las 3 columnas sino siguiendo el mismo procedimiento que las otras tres, operando con rendimientos medios y considerando el nivel medio de salinidad de los 3 años.

Atendiendo a la tolerancia a la sal (CEe)(Maas y Hoffman, 1977) podemos clasificar los cultivos de la zona en los siguientes grupos:

Cuadro 13. Efecto de la salinidad sobre los rendimientos de los cultivos de la zona (%)

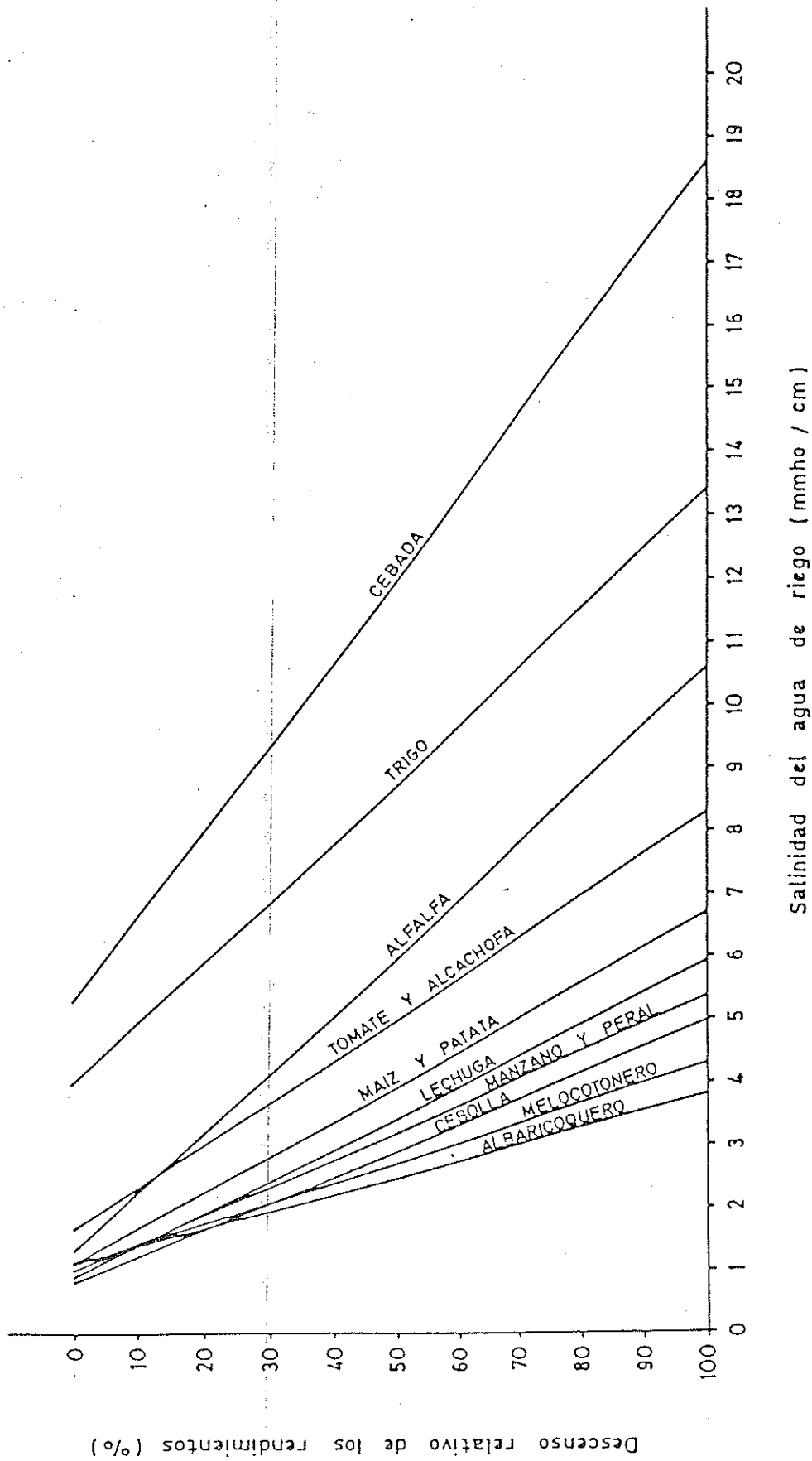
Nivel de salinidad	2,25 mmho/cm	2,4 mmho/cm	1.675 mmho/cm	2,1 mmho/cm
Cultivo	1980	1981	1982	Media
Trigo	100	100	100	100
Cebada	100	100	100	100
Maíz	79,7	76,9	90,4	82,5
Alfalfa	89,5	87,8	95,8	91,1
Manzano	73,7	70,0	88,1	77,5
Peral	73,7	70,0	88,1	77,5
Melocotonero	64,1	59,4	81,7	68,7
Albaricoquero	58,9	53,6	78,7	64,3
Patata	79,7	76,9	90,4	82,5
Espárrago	100	100	100	100
Lechuga	72,1	69,2	84,6	75,0
Tomate	90,8	88,6	100	93,3
Cebolla	64,8	61,4	78,1	68,2
Alcachofa	90,8	88,6	100	93,3

i) Cultivos moderadamente tolerantes: trigo, cebada y espárrago. Se caracterizan por tener un umbral de salinidad mayor de 4.0 mmho/cm, caso del trigo y la cebada y/o bien una tasa de descenso de los rendimientos por unidad de incremento de salinidad muy baja, caso de los tres cultivos.

ii) Cultivos moderadamente sensibles: maíz, alfalfa, patata, lechuga, tomate y alcachofa. El umbral de salinidad se encuentra entre 1,5 y 2,5 mmho/cm y la tasa de decrecimiento se sitúa entre un 10 y un 15%.

iii) Cultivos sensibles: frutales y cebolla. El umbral de salinidad es bajo (alrededor de 1 mmho/cm) y la tasa de decrecimiento ronda el 20 %.

Fig. 1. RELACION ENTRE EL NIVEL DE SALINIDAD (EC_w) Y EL DESCENSO DE LOS RENDIMIENTOS (%).



7. Pérdidas originadas por la salinidad

El objetivo de este segundo apartado era calcular las pérdidas actuales debidas exclusivamente a la salinidad. No se ha entrado por tanto a valorar las repercusiones que tendría en el mercado un aumento del rendimiento y por tanto un aumento de la oferta. Es decir se ha asumido una hipótesis de -- precios constantes.

Se ha visto como la ausencia del problema salino afecta únicamente a los rendimientos (teniendo en cuenta los datos utilizados en el modelo). A su vez, este incremento de los rendimientos supone un aumento del margen bruto, en tanto en cuanto aumenta el ingreso (se ha considerado que los costes permanecen constantes, es decir, se ha utilizado la hipótesis de que los agricultores no saben a priori qué rendimientos van a obtener, puesto que no saben cómo les está afectando la salinidad, y por tanto emplean las mismas cantidades de fertilizantes y abonos) y, un aumento de la producción.

El agua disponible no varía, ni tampoco las necesidades de agua, así -- como las restricciones "tierra" (rotaciones, etc). Las modificaciones introducidas se recogen en el cuadro 15 (la variación en rendimientos queda recogida en el apartado anterior).

La metodología empleada así como el procedimiento de resolución es la misma que en el caso anterior. Únicamente es necesario hacer dos consideraciones:

i) Han sido introducidas las modificaciones en rendimientos, producciones y márgenes brutos unitarios.

ii) El objetivo perseguido ya no es describir la situación actual por lo que carece de sentido utilizar un margen bruto global de 1.115 millones de pta que es el que se estaba obteniendo actualmente.

Ahora bien, es necesario dar un valor a dicho margen bruto. Dadas las posibilidades de la programación por metas se ha optado por darle un valor -- muy alto que no es previsible que se alcance (1.500 millones de pta). En es-

te caso, al minimizar la variable de desviación η_{10} nunca podría ésta alcanzar un valor nulo. La diferencia entre el valor dado al margen total y el valor de la variable de desviación, nos dará el margen bruto total que se obtendría actualmente si los cultivos no estuviesen afectados por la salinidad del agua de riego.

Cuadro 14. Rendimientos hipotéticos (kg/ha) de los cultivos de la zona sin tener en cuenta la salinidad del agua de riego

	1980	1981	1982	Media
Trigo	5.224	4.432	4.617	4.758
Cebada	4.985	3.305	4.894	4.394
Maíz	9.640	8.301	7.533	8.472
Alfalfa	15.312	16.493	15.317	15.900
Manzano	17.745	33.138	24.030	24.914
Peral	7.810	21.165	14.990	14.644
Melocotonero	6.834	17.678	11.899	12.106
Albaricoquero	5.850	25.283	20.282	17.250
Patata	20.686	21.781	18.339	20.218
Espárrago	4.000	3.800	3.700	3.833
Lechuga	21.743	22.890	20.195	21.666
Tomate	32.760	37.319	33.500	34.500
Cebolla	47.320	48.510	42.665	46.130
Alcachofa	8.736	10.026	9.000	9.248

En el primer proceso de optimización, al igual que ocurría en el caso anterior las variables de desviación son todas nulas. Introducidos estos valores en el segundo modelo y continuando el proceso se obtuvo una variable desviación (η_{10}) no nula. Por lo tanto la solución obtenida en esta segunda etapa es óptima. Los resultados se recogen en el cuadro 16, incluyéndose asimismo la solución obtenida en el apartado anterior.

La primera conclusión que cabe extraerse es que, como era esperado, el margen bruto es superior al que se está obteniendo actualmente. Concretamente el coste actual de la salinidad asciende a algo más de 307 millones de pesetas (en términos de pérdida de margen bruto).

Otro hecho que merece la pena destacarse es que el número de horas de trabajo necesarias para conseguir esta producción es un 2 % superior a la cifra que habíamos considerado como disponibilidad global de mano de obra. Sin embargo esto no supone que esta producción no se pueda alcanzar, ya que hemos

Cuadro 15. Producción mínima, máxima y margen bruto sin salinidad.

Cultivo	Producción mínima (t)	Producción máxima (t)	Margen bruto (miles de pta)
Trigo	17.053	21.139	57
Cebada	2.599	4.129	39
Maíz	31.353	42.155	112
Alfalfa	56.000	58.004	95
Manzano	2.051	3.842	383
Pera	1.245	3.376	323
Melocotonero	1.483	3.847	472
Albaricoquero	400	1.730	322
Patata	1.767	2.075	68
Espárrago	51	77	323
Lechuga	336	980	209
Tomate	2.540	3.299	82
Cebolla	1.452	3.437	134
Alcachofa	205	922	176

Fuente: Elaboración propia.

dicho anteriormente que el potencial de trabajo en esta zona es superior a lo fijado por nuestro modelo. Al tomar esta cifra lo único que se pretendía era aproximar lo mas posible la solución obtenida a la realidad, que es precisamente lo que ha ocurrido en este caso (no se debe olvidar que al objetivo de mano de obra le hemos atribuido un nivel prioridad 3).

La superficie dedicada a trigo no varía. En principio parece lógico -- puesto que es un cultivo tolerante a la sal y no le afecta una salinidad de 2 mmho/cm. Por el contrario la cebada, de características similares al trigo,-

casi duplica su superficie comparándola con la situación anterior. La razón estriba en que es el cultivo con un margen bruto menor. Cuando la solución debía adaptarse a un valor (caso anterior) es lógico pensar que los cultivos con menor margen bruto ocuparán una superficie menor. En este caso no existe limitación en el margen total a alcanzar, por lo que la cebada tenderá a alcanzar valores máximos, sobre todo cuando tanto el trigo como la cebada no necesitan agua en el mes de Julio que es la restricción que condiciona el mapa de cultivos de la zona.

Los frutales son uno de los cultivos más afectados por la salinidad, de ahí que los márgenes brutos alcancen valores importantes cuando no se tiene en cuenta el efecto salino. Desde el punto de vista de la superficie, al ser cultivos muy rentables, ésta alcanza los valores más elevados del conjunto de soluciones. Igualmente ocurre con las hortalizas que, globalmente, alcanzan casi la superficie máxima impuesta por la rotación. Individualmente cultivos -- con mayores márgenes brutos alcanzan los valores máximos. Únicamente el tomate no alcanza este valor máximo debido a que su margen bruto es pequeño en relación al resto de cultivos hortícolas.

En cuanto a maíz y alfalfa la modificación de los rendimientos supone una ampliación del espacio de soluciones. El maíz es un cultivo que alcanza un valor mínimo porque aunque globalmente necesita menos agua que huerta y -- frutales, en Julio las necesidades de agua son mayores o iguales que las demás y además su margen bruto es 2 ó 3 veces menor que el del resto de los cultivos. La alfalfa, en cambio, necesita menos agua que el maíz y tanto como los frutales, por lo que es normal que no llegue a ocupar la superficie máxima en beneficio de los mismos.

Así pues la introducción de la hipótesis de no salinidad supone un aumento considerable del margen bruto total debido no sólo al incremento de la superficie cultivada total (que por el contrario es menor) sino también al -- aumento de los márgenes brutos individuales. El agua sigue siendo el factor -- limitante de la superficie (concretamente en el mes de Julio). Atendiendo a -- este factor se observa que el trigo y la cebada no necesitan agua en este mes, mientras que la alfalfa y los frutales necesitan un volumen menor que el maíz y la huerta. Como a igual volumen de agua es preferido el cultivo con mayor margen bruto, frutales y huerta que son los cultivos más sensibles a la --

Cuadro 16. Superficie y márgenes brutos sin salinidad

Superficie actual Cultivo	Superficie actual con salinidad (ha)	Superficie actual sin salinidad (ha)
Trigo	4.443	4.443
Cebada	591	939
Maíz	3.969	3.700
Alfalfa	3.812	3.645
Manzano	79	154
Peral	155	230
Melocotonero	300	317
Albaricoquero	22	100
Patata	87	87
Espárrago	20	20
Lechuga	14	45
Tomate	71	73
Cebolla	30	74
Alcachofa	23	99
T O T A L	13.625	13.932
MARGEN BRUTO	$1.115 \times 10_6$ pta	$1.422 \times 10_6$ pta

sal (y por tanto aumentan bajo la hipótesis de no salinidad en mayor proporción su margen bruto) duplican aproximadamente la superficie en detrimento de maíz y alfalfa. La superficie dedicada a trigo y cebada alcanza los valores máximos posibles ya que no se ven afectados ni por la salinidad ni por la restricción de agua.

III. SITUACION FUTURA

Se trata de realizar una previsión de lo que puede ocurrir en el futuro si continúa la tendencia actual a la salinización. El horizonte temporal escogido ha sido 30 años, tiempo que se ha considerado suficientemente razonable como para que el problema de la salinidad alcance cotas preocupantes.

El análisis se centra en los siguientes puntos:

1. Análisis de la tendencia a la salinización de las aguas de las acequias Urdán y Rabal y predicción del nivel de salinidad al cabo de los 30 años.

2. Estimación de las pérdidas debidas a la salinidad.

3. Búsqueda de posibles soluciones al problema y evaluación de las mismas.

1. Nivel de salinidad en el futuro

El proceso de salinización no es constante, sino que presenta cierta variabilidad que tiene que ser tenida en cuenta en cualquier proceso predictivo.

La salinidad depende de caudal del río (Aragüés y Alberto, 1983). El caudal y la salinidad que transporta un río dependen de las contribuciones relativas de los aportes subterráneos y subsuperficiales, que son más constantes y de peor calidad, y de las escorrentías de precipitación, que tienen una mejor calidad pero son más esporádicas. De forma general puede decirse que en momentos de bajos caudales la calidad de la gran mayoría de las aguas de la subcuenca empeora.

Asociado a este ciclo de fluctuaciones de caudales, se manifiesta en diversos puntos de la subcuenca un ciclo estacional de la calidad con unos máximos de concentración salina coincidentes en general con los periodos de máxima demanda para riego.

Existe un ciclo de calidad condicionado por las variaciones interanuales de las precipitaciones de la cuenca. Sobre esta fluctuación interanual se puede observar una tendencia al incremento de la salinidad (Aragüés y Alberto, 1983).

Por último cabe destacarse una variabilidad espacial que, si bien es manifiesta cuando se trata de analizar toda la cuenca del Ebro, no lo es tanto al considerar una zona no muy extensa, como la regada por las acequias de Urdán y Rabal, al no disponer más que de mediciones tomadas en un único punto.

Los datos utilizados para el análisis de las tendencias vienen recogidas en el Anejo V. Existe una gran variabilidad, apareciendo concentraciones salinas desde 0,5 (que serían poco importantes) hasta 3,0 mmho/cm. Hay que hacer constar que los datos tienen dos procedencias diferentes: 1) de Octubre de 1974 hasta Octubre de 1978, ambos meses inclusive, los datos proceden del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU), en su publicación periódica sobre análisis de calidad de las aguas con un dato mensual; 2) para el resto de los años existen cuatro mediciones mensuales realizadas directamente por el Departamento de Suelos y Riegos del Servicio de Investigación Agraria -- (SIA) de la Diputación General de Aragón (DGA). A pesar de ello los datos son bastante coherentes.

A parte de la variabilidad, el problema más importante es el de la -- falta de datos. Si se consideran medias mensuales se disponen de 108 datos -- (que a simple vista parecen suficientes) y si se consideran medias anuales, -- solo se disponen de 9 datos.

No se debe de olvidar, sin embargo, que el objetivo previsto es la -- predicción. Teniendo esto en cuenta, si se trabaja con datos mensuales la -- predicción habría que realizarla para el período $t + 360$, lo cual parece un -- horizonte muy alejado para que sea fiable. Si se trabaja con datos anuales -- (considerando el año hidráulico y no el año natural, que empieza en Octubre y acaba en Septiembre) la predicción se hará para el año $t + 30$. Sin embargo el modelo sería estimado a partir de 9 datos únicamente con lo que existirían po -- cos grados de libertad y habría problemas al contrastar la significación esta



dística de la estimación. La única ventaja de trabajar con medias anuales es que la variabilidad de los datos mensuales queda más amortiguada, lo que puede redundar en un mejor ajuste.

Se presenta la disyuntiva de trabajar con datos mensuales o con datos anuales. La metodología que se va a seguir va a ser utilizar como modelo predictivo el elaborado con datos anuales; ahora bien se estimará un modelo mensual con el fin de detectar cuál es la tendencia mensual, transformarla en una tendencia anual y compararla con el modelo anual (si existe desviación se tomará una media) y se predecirá el nivel de salinidad al cabo de 30 años.

1.1. Estimación anual

Cunningham y Morton (1983) elaboraron un modelo para analizar la tendencia de la salinidad en el río Murray, a partir de datos mensuales. Su modelo se compone de una parte determinística y una parte aleatoria. A su vez la parte determinística se compone de un término independiente (que podríamos llamar salinidad autónoma), el componente tiempo y un componente estacional para lo cual se definen 11 variables ficticias, cada una de las cuales toma un valor 1 para un determinado mes y cero para el resto, salvo en el caso de Diciembre donde no se define variable ficticia para no concurrir en un caso de multicolinealidad. El componente aleatorio se comporta siguiendo un modelo autorregresivo de orden 1. Los resultados no son buenos y dada la estrecha correlación inversa entre caudal y concentración salina son introducidas en el modelo dos variables más: el caudal en cada mes y el caudal en el mes anterior. Esta última variable se introduce con el fin de poder recoger el reciclaje de las aguas una vez usadas para riego. En definitiva el modelo propuesto es:

$$CE_t = \alpha + \beta t + \gamma_0 W_t + \gamma_1 W_{t-1} + \sum_{i=1}^{11} \beta_i S_{it} + \epsilon_t$$

donde t = tiempo

W_t = caudal en el período t

W_{t-1} = caudal en el período $t-1$

S_{it} = variables ficticias estacionales



CE, W y W_{t-1} están expresados en términos de logaritmos y siendo

$$\epsilon_t = \rho \epsilon_{t-1} + U_t$$

Otros autores (Hirsch et al., 1982) utilizaron un modelo con las mismas variables pero con un tratamiento metodológico totalmente distinto, basándose en el método de Kendall y en experimentos de Montecarlo y no en regresiones lineales. Wolman (1971) y O'Conner (1976) se preocuparon más de -- cuestiones teóricas o bien de aspectos concretos entre la relación caudal-concentración salina.

Teniendo en cuenta todos estos estudios, se ha definido el modelo de la siguiente forma:

$$Y_t = f(Y_{t-1}, t, X_t, X_{t-1})$$

donde: Y_t = concentración salina en el período t
 Y_{t-1} = concentración salina en el período t-1
 X_t = caudal en el período t
 X_{t-1} = caudal en el período t-1
t = tiempo

Antes de analizar los resultados debemos hacer las siguientes -- puntualizaciones:

i) No se han transformado los datos tomando logaritmos neperianos. La razón estriba en que el objetivo último es la predicción. Disponemos únicamente de nueve datos y la predicción es para dentro de 30 años. Pudiese ocurrir que para los nueve datos disponibles se ajustara mejor la transformación logarítmica, pero al cabo de 30 años, mientras que la regresión lineal supone un incremento constante, el modelo con los datos transformados supone un incremento exponencial que podría dar lugar a un error significativo.

ii) La variable X_{t-1} se ha introducido con un objetivo puramente experimental, puesto que trabajando con datos anuales pierde el sentido que le atribuyeron Cunningham y Morton en el trabajo citado.

iii) Trabajando con datos anuales se ha prescindido del componente estacional.

iv) Se ha considerado que desde el punto de vista anual la introducción de la variable dependiente retardada en un período podría reforzar el ajuste, considerando que la concentración salina de un año permite explicar la concentración del año siguiente, puesto que la salinidad es un fenómeno acumulativo.

v) Se ha considerado que la perturbación aleatoria ε_t es un ruido blanco. ($E(\varepsilon_t) = 0$, $E(\varepsilon_t, \varepsilon_{t-s}) = 0$, $E(\varepsilon_t^2) = \sigma^2$ constante) a no ser que los resultados y el estadístico de Durbin-Watson refleje lo contrario.

vi) Como soporte informático se ha utilizado el paquete de programas BMDP instalados en el Centro de Cálculo de la Universidad de Zaragoza.

vii) Obtenidos los datos sobre concentraciones salinas (Anejo V) quedaba únicamente, para proceder a la estimación del modelo, recoger datos sobre el caudal del río en el punto de tracción. Desgraciadamente no se disponen de tales datos por lo que se tomaron los datos de caudal de la Estación de aforos que la Comisaría de Aguas del Ebro tiene en Ardisa (unos 50 km al norte de las acequias). Este hecho puede, en cierto modo, desvirtuar la relación caudal-concentración salina, pero son los únicos datos disponibles (Anejo VI). Sin embargo es necesario hacer notar que aunque el pantano de Ardisa está situado antes de las tomas de las acequias de Candevania y Camarera y del desagüe del barranco de La Violada y otras fuentes salinas, tales aportes son relativamente constantes (según las mediciones realizadas por el Departamento de Suelos y Riegos del SIA), por lo que, a pesar de que el caudal del río a la altura de las dos acequias es sensiblemente menor que en Ardisa, la relación caudal-concentración no se ve cualitativamente muy afectada.

Una vez obtenidos los datos se sacaron las medias anuales (año hidrológico) y se procedió a la estimación.

Se diseñaron tres modelos:

$$\text{Modelo 1: } Y_t = a + bt + cx_t + \epsilon_t$$

$$\text{Modelo 2: } Y_t = a + bt + cx_t + dy_{t-1} + \epsilon_t$$

$$\text{Modelo 3: } Y_t = a + bt + cx_t + dx_{t-1} + \epsilon_t$$

Los resultados obtenidos se recogen en el cuadro 17.

Cuadro 17. Estimación anual de la salinidad de la acequia Urdán

Concepto	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
\hat{a}	2,33 (9,19)	2,87 (4,80)	2,37 (6,29)
\hat{b}	0,03 (1,29)	0,03 (0,80)	0,02 (0,57)
\hat{c}	-0,03 (-3,45)	-0,03 (-3,42)	-0,03 (-3,30)
\hat{d}		-0,21 (-0,77)	0,006 (0,52)
R^2	0,70	0,76	0,74
\bar{R}^2	0,60	0,58	0,55
Grados libertad numerador	2	3	3
Grado libertad denominador	6	4	4
Estadístico F (F tablas 5 %)	7,11 (5,14)	4,27 (6,59)	3,88 (6,59)
Estadístico Durbin-Watson	2,25	2,76	3,01

Nota: los valores en paréntesis corresponden al estadístico t

A la vista de los resultados puede deducirse:

i) tanto en el modelo 2 como en el 3 se rechaza la significatividad conjunta del modelo (el valor del estadístico F es menor que el que existe en tablas).

ii) El coeficiente de determinación es mayor en los modelos 2 y 3 que en el modelo 1 aunque esto se debe a la introducción de una variable más. Nos tendremos que fijar pues en el coeficiente de determinación corregido (\bar{R}^2) que es menor en ambos modelos.

iii) En los tres modelos los signos de los estimadores \hat{b} y \hat{c} son los esperados a priori. Sin embargo en el modelo 2 el estimador \hat{d} aparece con signo negativo, lo que supone una contradicción con la realidad en el sentido

de que lo normal es suponer que, puesto que la salinidad tiene un efecto acumulativo, la concentración salina de un año incida positivamente en la del año siguiente.

En este mismo sentido, en el modelo 3, tampoco parece lógico que el coeficiente que acompaña a X_{t-1} (el caudal retardado en un período) sea -- positivo ya que si en el año anterior el caudal era alto el desagüe también -- será alto y por tanto la concentración salina será menor.

iv) Si se analiza la significatividad individual de las variables resulta que tanto el caudal como el término independiente son variables explicativas de la salinidad de acuerdo con el valor del estadístico t. Sin embargo el valor del estadístico t de la variable tiempo es bajo, si bien es una variable indispensable para determinar la tendencia a la salinización y -- por lo tanto debe de introducirse en el modelo. Tampoco son explicativos las variables salinidad y caudal retardados en un período en los modelos 2 y 3, -- respectivamente. Teniendo todo esto en cuenta parece más apropiado la utilización del modelo 1.

v) El valor del estadístico Durbin-Watson (D-W) permite afirmar la ausencia de autocorrelación en el modelo 1 (y por tanto asegurar la validez de los contrastes de hipótesis), mientras que en los otros dos casos se sitúa en la zona de indeterminación (a efectos prácticos consideraremos que -- no existe autocorrelación tal como se suele suponer comúnmente).

En definitiva, se desprende que el modelo 1 es desde el punto de vista estadístico el más aceptable y será por tanto el que se utilice para la predicción.

Cada uno de los cultivos estudiados tiene unas necesidades de -- agua diferentes y unas épocas de riego distintas (Anejo VII). Sin embargo, -- pueden clasificarse en tres grupos:

i) Trigo y cebada: Necesitan un riego antes de la siembra (mes -- de Octubre) y luego se riegan de Febrero a Mayo unas cuatro veces.

ii) Patata, alfalfa y maíz: su época de riego abarca aproximadamente los meses que van de Marzo a Septiembre.

iii) Frutales y huerta: son regados cada 15 días más o menos entre Mayo y Septiembre.

Atendiendo a esta característica y tomando la estructura del modelo 1 se diseñaron otros tres que se diferenciaban en los datos utilizados para la estimación del modelo. Los datos de caudal y concentración salina ya no son la media del año hidrológico sino la media obtenida considerando los meses de riego de cada uno de los grupos descritos anteriormente.

Los resultados, sin embargo, no fueron sustancialmente diferentes a los ya obtenidos. Únicamente era un poco superior el coeficiente de determinación pero en los tres casos no era significativo el tiempo. Por tanto, y dado que no era posible solucionar este problema se desecharon y se trabajó únicamente con el modelo 1, con las mencionadas limitaciones puesto que es más operativo que trabajar con tres modelos diferentes.

1.2. Estimación mensual

Cuando trabajamos con datos mensuales es válida también la consideración de no tomar logaritmos neperianos tal como se ha visto en el modelo anual. Sin embargo, y dada la gran variabilidad de los datos se han introducido variables ficticias con el fin de recoger el componente estacional, que afectan únicamente a lo que hemos denominado la salinidad autónoma, sin afectar por tanto a la pendiente de la recta.

A priori se ha trabajado con cuatro modelos, el primero de los cuales no recoge el componente estacional y las otras tres si.

$$\text{Modelo 4: } Y_t = a + bt + cx_t + e_t$$

$$\text{Modelo 5: } Y_t = a + bt + cx_t + \sum_{i=1}^{11} m_i S_{it} + \epsilon_t$$

$$\text{Modelo 6: } Y_t = a + bt + cx_t + dY_{t-1} + \sum_{i=1}^{11} m_i S_{it} + \epsilon_t$$

$$\text{Modelo 7: } Y_t = a + bt + cx_t + dX_{t-1} + \sum_{i=1}^{11} m_i S_{it} + \epsilon_t$$

El primer modelo se introdujo con carácter experimental y con el fin de comparar resultados con los otros tres que consideran el componente estacional.

Los modelos 5,6 y 7 son los mismos que los diseñados para datos anuales con la introducción de las variables ficticias. En este sentido cabe destacarse, cuando trabajamos a nivel mensual, que la introducción de las variables Y_{t-1} y X_{t-1} desde esta perspectiva temporal tienen un sentido lógico.

Las estimaciones obtenidas se recogen en el cuadro 18.

El valor del estadístico de Durbin-Watson permite afirmar la ausencia de autocorrelación en todos los modelos (ya sea en sentido estricto o por caer en la zona de indeterminación), es decir que son válidos los contrastes de hipótesis realizados.

La elección del mejor modelo se realizó en base al mayor coeficiente de determinación corregido que en este caso correspondía al modelo 6 - aunque también podía considerarse el modelo 7.

El modelo 4 era precisamente el que se había considerado como válido cuando trabajábamos con datos anuales. En este caso el ajuste es bastante peor, lo cual parece lógico porque en el primer caso la variabilidad de los datos estaba más amortiguada. La introducción de las variables estacionales mejoran bastante el ajuste, a pesar de que la mayor parte no son significativas. Sin embargo el ajuste sigue siendo peor que en el caso anual.

En el modelo 6 se ha introducido la variable endógena retardada en un período y en el 7 la variable caudal retardada en un período. Estos dos modelos proporcionan un mejor ajuste. En primer lugar ambos recogen el efecto

lógico que produce la introducción de dichas variables. Así en el primer caso la concentración salina de un mes tiene un efecto del mismo signo sobre la -- concentración de mes siguiente y, en el segundo, el caudal de un mes, por -- efecto del reciclaje de las aguas, aumenta el caudal del mes siguiente y provoca un efecto de signo contrario sobre la concentración salina del siguiente

Cuadro 18. Estimación mensual de la salinidad de la acequia Urdan

Concepto	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6	Modelo 7
\hat{a}	2,19 (19,41)	2,34 (13,16)	1,88 (7,75)	2,42 (13,81)
\hat{b}	0,003 (2,37)	0,003 (2,26)	0,002 (1,74)	0,003 (2,29)
\hat{c}	-0,02 (-9,42)	-0,02 (-8,20)	-0,02 (-7,03)	-0,02 (-6,72)
\hat{d}			0,21 (2,69)	-0,009 (-2,61)
\hat{m}_1		0,08 (0,40)	0,06 (0,32)	0,06 (0,31)
\hat{m}_2		-0,04 (-0,19)	-0,08 (-0,39)	-0,07 (-0,36)
\hat{m}_3		-0,27 (-1,27)	-0,29 (-1,38)	-0,29 (-1,41)
\hat{m}_4		-0,77 (-3,56)	-0,72 (-3,41)	-0,77 (-3,63)
\hat{m}_5		-0,20 (-0,89)	-0,05 (-0,24)	-0,20 (-0,92)
\hat{m}_6		-0,51 (-2,31)	-0,40 (-1,85)	-0,38 (-1,77)
\hat{m}_7		-0,04 (-0,20)	0,11 (0,51)	0,03 (0,18)
\hat{m}_8		-0,25 (-1,17)	-0,23 (-1,12)	-0,22 (-1,06)
\hat{m}_9		0,02 (0,09)	0,04 (0,21)	0,003 (0,01)
\hat{m}_{10}		-0,16 (-0,76)	-0,09 (-0,44)	-0,03 (-0,16)
\hat{m}_{11}		-0,01 (-0,07)	0,02 (0,13)	0,002 (0,01)
R^2	0,47	0,60	0,62	0,62
\bar{R}^2	0,46	0,54	0,57	0,57
Grados libertad numerado	2	13	14	14
Grados libertad denominador	105	93	92	92
Estadístico F (F tablas)	47,90 (3,06)	10,74 (1,86)	14,38 (1,80)	11,08 (1,80)
Estadística Durbin-Watson	1,80	1,74	2,17	1,73

Nota: Los valores en paréntesis corresponden al estadístico t.

mes. Cabe recordar que este efecto no se recogía cuando trabajábamos con datos anuales.

El R^2 de los dos modelos es semejante, ambos son significativos considerados desde una perspectiva global, sin embargo puede considerarse preferible el modelo 7 si se analizó la significatividad individual de cada variable. Así mientras en el modelo 6, la variable tiempo no es significativa, en el otro caso sí lo es, siendo por otro lado parejos los resultados obtenidos en el resto de las variables.

Por tanto, y desde un punto de vista estadístico, el modelo 7 -- tiene una mayor potencia predictiva. De todas formas sigue siendo mejor el modelo obtenido con datos anuales. A partir de aquí, y tomando como referencia el modelo 7, se tratará de intentar obtener un mejor ajuste.

El primer paso realizado fue sustituir las 11 variables ficticias (la mayor parte de las cuales no son significativas) por una única variable ficticia K que adopta valor 1 para los meses de no riego (Noviembre a Marzo) y valor cero para el resto de los meses. El resultado no mejoró ya que el R^2 fue de 0,56 (inferior al obtenido), todas las variables eran significativas y el modelo considerado globalmente también era significativo.

El siguiente paso fue analizar los residuos, considerados como diferencia entre valor observado y valor estimado. Se pudo apreciar que en cuatro casos el residuo alcanzaba un valor próximo o superior a 1 mmho/cm y con signo negativo, precisamente en aquellos casos en los que se pasaba de una concentración salina alta (2 ó 2,5 mmho/cm) a una concentración baja (alrededor de 0,5 mmho/cm). Estos cambios bruscos de tendencia no son recogidos por el modelo y provocaban un empeoramiento del ajuste. Este problema se subsanó definiendo una variable ficticia, que tomase valor 1 en estos casos y valor cero en el resto, añadido al último modelo estudiado. El modelo obtenido fue:

$$\hat{Y}_t = 2,45 + 0,002 t - 0,01 X_t - 0,01 X_{t-1} - 0,31 K_t - 0,89 Z_t$$

(22,77) (2,02) (-6,10) (-4,21) (-3,79) (-4,42)

El valor del estadístico Durbin-Watson permite afirmar la ausencia de autocorrelación (zona de indeterminación), el modelo es significativo ($F_{101}^5 = 35,49$) y el coeficiente de determinación era ligeramente superior al del Modelo 7 (0,63). En principio este modelo era superior, ya que además todas las variables eran individualmente significativas. Analizando los nuevos residuos se pudo comprobar la existencia de un dato que podía desvirtuar los resultados. En efecto, el caudal de Junio de 1979 era de $106,85 \text{ m}^3/\text{sg}$ que es muy superior al resto de los meses y más concretamente a los datos de Junio de otros años, lo cual provocaba una concentración salina estimada negativa. Se optó por prescindir de dicho dato lo que suponía suprimir dos casos (puesto que hemos considerado tanto el caudal de un mes como el del mes inmediatamente anterior). El modelo resultante fue:

$$\hat{Y}_t = 2,57 + 0,002 T - 0,02 X_t - 0,01 X_{t-1} - 0,2 K - 1,28 Z_t$$

(26,75) (2,03) (-7,80) (-3,84) (-2,68) (-6,85)

$$R^2 = 0,72; \quad \tilde{R}^2 = 0,71; \quad F_{39}^5 = 52,52$$

Como puede apreciarse este es el mejor modelo que se ajusta más fielmente a los datos mensuales y que tiene una potencia predictiva ligeramente superior al del anual.

1.3. Futuro nivel de salinidad

Se han obtenido hasta ahora dos modelos con el fin de determinar la tendencia a la salinización: uno con datos anuales y otro con datos mensuales. El primero va a ser el que sea utilizado para la predicción, puesto que el error cometido para determinar el nivel de salinidad en el período $t + 30$ es inferior al cometido cuando se trata de hacer una predicción para el período $t + 360$, aún cuando la base de datos sea inferior, además de otras -- consideraciones de tipo práctico, en el sentido de que más o menos puede estimarse cuál va a ser el caudal futuro dentro de 30 años, pero es imposible -- determinar el caudal en Junio y Julio dentro de 30 años.

El segundo modelo nos va a servir para contrastar la tendencia - anual.

Según el modelo anual la concentración salina tiende a aumentar $36,4 \times 10^{-3}$ mmho/cm cada año. Según el segundo modelo la tendencia es de $23,2 \times 10^{-3}$ mmho/cm cada mes. Esta tendencia mensual equivale, considerando la salinización como un proceso acumulativo, a un incremento anual de $28,2 \times 10^{-3}$ mmho/cm. Como se puede comprobar los resultados son parejos, por lo que se ha optado por considerar una tendencia anual que sea media de las dos, o sea $0,0323682$ mmho/cm, que va a ser la que se va a utilizar para calcular el nivel futuro de salinidad.

El modelo para la predicción vendrá definido por tanto mediante la siguiente ecuación:

$$\hat{Y}_{t+30} = 2,33777 + 0,0323682 (t + 30) - 0,0348156 X_{t+30}$$

Como la predicción es a 30 años a la variable tiempo le daremos el valor 39. Queda sin embargo por concretar cuál será el caudal futuro.

Para calcular este caudal futuro se han tomado los caudales del Gállego en Ardisa en los últimos 40 años (MOPU, 1979) tal como viene recogido en el Anexo VIII. Obtenidos los datos se calculó la media de los 9 primeros años, desde 1945-46 hasta 1953-54, que fue de $23,08 \text{ m}^3/\text{sg}$ y se calculó también la media actual (desde 1974-75 hasta 1982-83) que era de $19,08 \text{ m}^3/\text{sg}$. En el transcurso de 30 años el caudal ha descendido en un 17,33 %. Suponiendo -- que el proceso es uniforme dentro de 30 años el caudal habrá disminuido en el mismo porcentaje, pasando a ser $15,77 \text{ m}^3/\text{sg}$.

Obtenido el caudal futuro bastará con sustituir en la ecuación -- para obtener el nivel futuro de salinidad ($3,05$ mmho/cm).

Así pues dentro de 30 años y si se cumplen las condiciones impuestas la concentración salina habrá aumentado en casi 1 mmho/cm respecto a la situación actual, alcanzando los $3,05$ mmho/cm que es un valor preocupante desde el punto de vista del rendimiento de las plantas.

2. Estimación de las pérdidas futuras

Para la estimación de las pérdidas futuras se va a utilizar la misma metodología que la empleada en el capítulo anterior cuando se calcularon las pérdidas actuales.

Es decir que únicamente se va a contemplar las pérdidas debidas a la salinidad. Ya se ha explicado reiteradamente que el proceso salino afecta principalmente a los rendimientos y por tanto a la producción y al margen bruto.

Partiendo de las tablas de la FAO (1976) se han calculado los rendimientos futuros de la siguiente forma:

i) Se han tomado como referencia los rendimientos que se obtendrían si no existiese salinidad (Cuadro 13).

ii) Utilizando las tablas de la FAO (1976) se ha calculado el porcentaje en que se reducirían los rendimientos con un nivel de salinidad de -- 3,05 mmho/cm.

iii) Multiplicando i) por ii) se obtienen los rendimientos futuros que se producirían sin considerar cambios tecnológicos, mejoras genéticas, -- etc.

En el cuadro 19 se recogen para cada cultivo el rendimiento relativo que se obtendría (expresado en tanto por ciento sobre el que se obtendría si no hubiese salinidad) dentro de 30 años y el rendimiento absoluto (en kg/ha).

Se van a analizar fundamentalmente dos escenarios:

a) En el primer escenario no se van a considerar cambios en ninguno de los recursos, salvo los debidos al proceso de salinización.

b) En el segundo se ha considerado un cambio en el factor agua. Tras consultar a diferentes expertos se ha estimado que dentro de 30 años el agua disponible podría reducirse en un 15 %, sin entrar en temas climáticos como frecuencia de lluvias, etc, factores que son totalmente imprevisibles.

Común a estos dos escenarios se han suprimido las restricciones relacionadas con la producción mínima puesto que el objetivo ya no es describir la situación actual sino que se trata de predecir una hipotética situación fu

Cuadro 19. Estimaciones de los rendimientos de los cultivos de la zona dentro de 30 años.

Cultivo	Rendimiento relativo (%)	Rendimiento futuro (kg/ha)
Trigo	100,0	4.758
Cebada	100,0	4.394
Maíz	65,2	5.524
Alfalfa	75,8	12.052
Manzano	53,7	13.379
Peral	53,7	7.864
Melocotonero	39,1	4.733
Albaricoquero	30,4	5.244
Patata	65,2	13.182
Espárrago	100,0	3.833
Lechuga	56,7	12.285
Tomate	79,8	27.531
Cebolla	46,6	21.497
Alcachofa	79,8	7.380

Fuente: FAO. 1976. Water Quality for Agriculture. Elaboración propia.

tura en la que puede haber cultivos que reduzcan su superficie en una gran proporción, llegando incluso a valores nulos, según cual sea su sensibilidad a las sales y sus necesidades de agua.

También es independiente de los dos escenarios el impacto sobre la producción máxima y sobre los valores de los márgenes brutos unitarios.

Para el cálculo de estos últimos se ha considerado que los precios de los productos y de los factores permanecen constantes, y por otro lado también se ha mantenido constante las cantidades aplicadas de los distintos factores, suponiendo por tanto que el agricultor no sabe a priori el rendimiento que va a obtener, utilizando las mismas cantidades por hectárea cultivada. En definitiva la variación en los márgenes unitarios vendrá motivada exclusivamente por un cambio en los rendimientos, tal y como se recoge en el cuadro 20.

Cuadro 20. Estimación de la producción y margen bruto de los cultivos de la zona dentro de 30 años.

Cultivo	Producción máxima (t)	Margen bruto (miles de pta/ha)
Trigo	21.139	57
Cebada	4.129	39
Maíz	25.293	52
Alfalfa	51.043	56
Manzano	1.654	132
Peral	1.451	82
Melocotonero	1.115	99
Albaricoquero	242	8
Patata	1.162	-
Espárrago	71	323
Lechuga	705	38
Tomate	2.210	23
Cebolla	2.062	-
Alcachofa	618	80

Fuente: Elaboración propia.

Antes de realizar ningún análisis, se aprecia que la patata y la cebolla, que hipotéticamente tendrían márgenes brutos negativos como consecuencia del descenso en los rendimientos debido al nivel futuro de salinidad, desaparecerían en la zona objeto de estudio. Por tanto no se considerarían en el proceso de optimización.

En lo referente al cálculo de la producción máxima futura, la estimación ha sido más compleja en el sentido de que sólo se dispone de datos para un único periodo. La forma de calcular dichas producciones ha sido mediante extrapolaciones de la siguiente manera: se conocen los rendimientos actuales (con y sin salinidad) y los futuros; así mismo se conoce la producción máxima actual (con y sin salinidad). El descenso proporcional de la producción actual debido al descenso de los rendimientos actuales por la salinidad ha servido para calcular la producción futura en base a la estimación de los rendimientos que pudieran existir (Cuadro 20).

Por último, cabe mencionar, al igual que se hizo al evaluar la pérdida actual, que al margen bruto global se le ha dado un valor alto, tratando de minimizar la desviación por defecto (η_{10}).

La forma de resolución ha sido la misma que la realizada anteriormente. En primer lugar se minimizó el agua disponible dando como resultado para ambos escenarios un valor nulo para todas las variables de desviación. Seguidamente, teniendo en cuenta este resultado se maximizó el margen bruto global, en ambos casos.

Como la solución daba un valor no nulo para η_{10} , el proceso de optimización quedó concluido sin considerar la tercera prioridad: minimizar la disponibilidad de mano de obra.

Los resultados en términos de superficie ocupada por cada cultivo - así como el margen bruto total para los dos escenarios, aparecen recogidos en el cuadro 21.

La primera nota significativa que puede destacarse al compararse ambas soluciones es que la reducción en el caudal afecta exclusivamente al maíz, lo cual, parece bastante lógico si se recuerda el razonamiento hecho en el capítulo anterior, en el sentido de que este cultivo tiene una necesidad muy alta de agua y su margen bruto unitario debido a su sensibilidad a la sal es muy bajo. Es decir que la reducción en la superficie dedicada a la agricultura debido a la reducción del agua disponible es absorbida en su totalidad por el maíz.

Cuadro 21. Superficie futura de los cultivos de la zona y margen bruto total

Cultivo	Superficie futura sin reducción de caudal (ha)	Superficie futura con reducción de caudal (ha)
Trigo	4.443	4.443
Cebada	939	939
Maíz	4.014	2.824
Alfalfa	3.980	3.980
Manzano	123	123
Peral	184	184
Melocotonero	235	235
Albaricoquero	-	-
Patata	-	-
Espárrago	20	20
Lechuga	-	-
Tomate	-	-
Cebolla	-	-
Alcachofa	83	83
Margen bruto total (pta)	789 x 10 ⁶	727 x 10 ⁶

Si ahora se comparan estas dos soluciones con las obtenidas anteriormente se pueden entresacar las siguientes conclusiones:

1) Comparando estos dos escenarios con una situación no salina, las pérdidas que se alcanzarían al cabo de 30 años ascienden a 633 y 695 millones de pta (de 1982). El cálculo de las pérdidas totales acumuladas en estos 30 años (siempre en pta de 1982) se ha realizado considerando las pérdidas actuales y futuras, como el primero y último término de una progresión geométrica (con lo que se está recogiendo el efecto acumulativo de la salinidad). Recordando que:

$$A_n = A_1 \times r^{n-1} ; \quad S = \frac{A_n \times r - A}{r-1}$$

siendo: A_1 = primer término de la progresión
 A_n = último término de la progresión
 r = razón de la progresión
 n = número de términos de la progresión

se han obtenido dichas pérdidas que alcanzarían 13.500 millones de pesetas en el primer escenario considerado y algo más de 14.270 millones de pesetas si se considera la reducción en el caudal. Precisamente esta última cifra será la que se tomará como referencia para evaluar las posibles soluciones al problema, dado que parece la situación más previsible.

2) Al haber suprimido la producción mínima, o lo que es lo mismo - los límites inferiores de las posibles soluciones, aquellos cultivos que tienen márgenes brutos bajos, desaparecerían de la zona en esta hipotética situación futura.

3) El trigo y la cebada, al no verse afectados por el nivel de salinidad futura, ni por las restricciones de agua (recordemos que no necesitan agua en el mes de Julio, que es el que define el mapa de cultivos en la zona) ocuparían la misma superficie que en una situación no salina.

4) En cuanto a los productos hortícolas, y dejando a un lado el caso de la cebolla ya mencionado anteriormente, hay que destacar que los niveles futuros de salinidad motivarían su casi completa desaparición. Únicamente el espárrago y la alcachofa se mantendrían. El primero debido a su resistencia a las sales, lo que motiva que no se reduzcan sus rendimientos y por tanto su margen bruto; y el segundo, porque, aunque es tan sensible al problema salino como el resto de los productos hortícolas, su margen bruto no se ve reducido a niveles inferiores a los cereales. De ahí que estos cultivos alcancen la mayor extensión posible dentro del espacio de soluciones posibles, lo que no había ocurrido anteriormente con la alcachofa.

5) A pesar de que los frutales son los cultivos más sensibles a los componentes salinos del agua de riego, su elevado margen bruto hace que, incluso con la reducción en el rendimiento, posea márgenes elevados. La excepción lo constituye el albaricoque cuyo margen se ve reducido a 8.000 pts/ha. Como este margen es inferior al de los cereales y además, requiere mayores do

sis de agua, es natural que desaparezca en favor de los primeros. El resto de los frutales, siguiendo la lógica de la maximización, alcanzarían los valores máximos dentro del conjunto de soluciones posibles, lo que tampoco había ocurrido cuando analizamos la situación actual. La superficie dedicada al melocotón descende, debido únicamente a la reducción del límite superior del espacio de soluciones, consecuencia a su vez de su mayor sensibilidad a las sales de agua de riego.

6) El maíz aumentaría su superficie respecto a la situación actual. Asimismo la alfalfa alcanzaría la superficie máxima posible teniendo en cuenta las consideraciones que sobre este cultivo han sido expuestas en el capítulo anterior. Es decir, la reducción en la superficie dedicada a patata, frutales y hortalizas, debido al impacto del agua salina, motiva que exista un excedente de agua en el mes más seco (Julio). Este excedente ha sido cubierto en primer lugar con alfalfa que necesita menos agua y que tiene un mayor margen bruto que el maíz y, en segundo lugar por este último hasta cubrir la totalidad de agua disponible. Consecuentemente la reducción de este recurso motivaría un descenso del excedente de agua que afectaría en primer lugar al maíz, tal como se ha indicado al principio de este apartado.

7) La reducción de la superficie dedicada a frutales y hortalizas provoca una disminución de la mano de obra necesaria en la zona que sólo puede ser transvasada en parte a cereales, maíz y alfalfa debido a que no son tan intensivos en mano de obra como los primeros. Todo esto provocaría, sobre todo en el supuesto de una reducción del caudal, un aumento del paro agrícola en la zona, o bien, un aumento del ocio de los agricultores existentes.

En definitiva, en una hipotética situación futura, el aumento del nivel de salinidad en el agua de riego, produciría una modificación substancial del mapa agrícola de la zona. Los cultivos más sensibles irían desapareciendo progresivamente. Esto provocaría un incremento del excedente de agua que sería cubierto paulatinamente por cultivos más resistentes. Esta situación, en un futuro más lejano, podría llevar a la preponderancia absoluta de cereales, maíz y alfalfa y a la desaparición del resto de los cultivos porque no serían rentables.

3. Soluciones al problema de la salinidad

Analizado el fenómeno de la salinidad y su impacto económico sobre la agricultura, no podría terminarse este estudio sin una referencia a las posibles soluciones a este problema; soluciones que no tienen como objetivo la desaparición del problema, sino más bien su control dado que el proceso es irreversible.

El cuadro 22 presenta, a modo de sinopsis, algunos tipos de acciones y objetivos perseguidos en relación con el control de la salinidad.

Concretando un poco más, y centrándonos en la salinidad del agua de riego pueden establecerse las siguientes medidas de control de la salinidad:

1) Aumentar la frecuencia de riego.

El aumento de la frecuencia de riego contribuye a mantener una mayor disponibilidad de agua en la parte superior de la zona de raíces dado que su potencial osmótico disminuye. Sin embargo el riego más frecuente produce también un incremento en la humedad del suelo.

Si el agua no es un recurso limitado, es decir, si es posible disponer de todo el agua que se necesita, la frecuencia del riego se puede ajustar a la demanda estacional de cada cultivo, por tanto es necesario un buen conocimiento de las necesidades de cada cultivo para determinar la frecuencia adecuada de riego. Existen algunas ayudas para determinar cuando un cultivo necesita agua: a) su apariencia física; b) utilización de tensiómetros o bloques de yeso en suelos no salinos; c) utilización de los datos diarios de la evapotranspiración de cada cultivo. Estos métodos son explicados con mayor extensión por Doneen (1971) y Doorenbos y Pruitt (1975).

En el caso de que no se disponga libremente del factor agua, sino que éste esté limitado por determinadas prácticas rotacionales (tal como ocurre en la zona objeto de estudio, donde la disponibilidad del agua viene fijada por el Sindicato de Riegos de Urdán y Rabal) es necesario considerar otros métodos para controlar la salinidad.

Cuadro 22. Acciones y objetivos tendentes a minimizar la salinización de las aguas

Acción	Objetivos
1 Instalación de medidores de caudal.	. Medir el agua de riego aplicada. . Penalizar al despilfarrador.
2 Revestir canales y/o instalar tuberías.	. Eliminar filtraciones. . Eliminar evapotranspiraciones freáticas. . Eliminar la evaporación (tuberías).
3 Optimizar el riego (diseño de la red de acequias; calendario de riegos; nivelación; métodos de aplicación; control de la evapotranspiración; fertilizantes; prácticas culturales).	. Distribuir el agua uniformemente. . Minimizar los flujos de retorno y las pérdidas por percolación profunda. . Aplicar el agua en el momento oportuno y en la cantidad adecuada. . Promover la precipitación de sales y/o minimizar la meteorización.
4 Optimizar el desagüe (diseño de la red de desagües; instalación de drenes (capas freáticas); bombeo de pozos).	. Mantener un balance de sales adecuado. . Controlar la capa freática. . Desplazar las sales de la zona de las raíces. . Evitar encharcamientos, falta de aireación, salinidad, sodicidad...
5 Optimizar la gestión del agua (flexibilizar y tecnificar la red de distribución; involucrar al regante; crear servicios de asesoramiento).	. Regar a la demanda. . Incrementar la eficiencia en la distribución. . Responsabilizar al regante.
6 Acciones preventivas (minimizar la construcción de embalses en zonas de elevada evapotranspiración, repoblar las zonas húmedas, etc).	. Evitar la evaporación del agua. . Controlar el ciclo hidrológico.
7 Acciones puntuales (construcción de canales de evacuación al mar u otros lugares apropiados; construcción de embalses de evaporación; inyecciones profundas de aguas saladas; desalinización).	. Evacuar las aguas salinizadas. . Minimizar los flujos de retorno. . Eliminar las sales del agua.
8 Investigación	. Adquisición de conocimientos.

Fuente: Aragués y Alberto, 1983. La salinización. Ponencia presentada en el Salón Monográfico del Agua. SMAGUA/83. Zaragoza.

A menudo existen otros muchos efectos que acompañan a un cambio en las prácticas de riego. Por ejemplo, un cambio a riegos más frecuentes puede dar como resultado la utilización de una cantidad excesiva de agua. Sin embargo si se dispone de un sistema eficiente de riego, el aumento en la frecuencia no tiene porqué llevar a la utilización de una cantidad mucho mayor de agua.

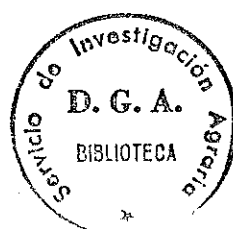
2) Mejor selección de cultivos.

Todos los cultivos no tienen una respuesta idéntica a la salinidad. Como ya se ha visto existen cultivos más sensibles y cultivos más tolerantes a la sal, de tal forma que cuando la salinidad alcance un nivel considerado como grave debe realizarse una selección de cultivos. El agricultor debe conocer el índice de salinidad de su agua de riego, así como la tolerancia de sus cultivos con el fin de obtener los mejores rendimientos (mayor beneficio).

Seleccionando los cultivos y administrando de forma adecuada el agua, cualquier agricultor puede obtener mejores rendimientos con el agua disponible o bien puede encontrar que el agua que consideraba desechable o no utilizable bajo un punto de vista que confiere prioridad absoluta a la calidad del agua, puede ser utilizable en ciertas situaciones. En muchos casos es preferible disponer de agua, aunque sea de mala calidad que no disponer de ella, y buscarle un uso óptimo (regando por ejemplo cereales y otros cultivos tolerantes).

3) Utilización de agua extra para el lavado.

La mayor parte de las sales procedentes del agua de riego, son bastante solubles y deben ser lavadas. Estas sales serán arrastradas por el agua pero lo importante es determinar qué cantidad de agua debe ser aplicada para que lave estas sales fuera de la zona de raíces.



Las necesidades de lavado (LR) para los distintos cultivos pueden ser calculados de diferentes formas. El método más simple y más comúnmente usado para calcular LR ha sido el método USDA (United States Department of Agriculture) (USDA, 1954).

$$LR = \frac{CE_w \times 100}{CE_d} = \frac{D_d \times 100}{D_w}$$

donde: CE_w = conductividad eléctrica del agua de riego
 CE_d = conductividad eléctrica del agua de drenaje
 D_d = volumen de drenaje
 D_w = volumen de riego

Esta ecuación se basa en la condición de régimen permanente, de tal manera que:

$$R + PE + CF = ET + E + PP + G$$

donde: R = Agua de riego
 ET = Evaporación del suelo + transpiración
 PE = Lluvia efectiva
 E = Escorrentía
 G = Agua del suelo
 PP = Percolación profunda
 CF = Capa freática

Es importante comprender el significado del valor calculado de LR. Representa la cantidad mínima de agua (en porcentaje sobre el agua aplicada) que debe pasar a través de la zona de raíces para controlar las sales.

El lavado puede no ser eficiente al 100 % dependiendo del tipo de suelo, drenaje y métodos de aplicación del agua. La existencia de grietas y otras hendiduras (gusanos, roedores, etc) en el suelo pueden transportar el agua más rápidamente de lo que sería necesario, a través de la zona de raíces, sobre todo cuando esta especie de canales entran en contacto con el agua de riego cerca de la superficie (Dieleman, 1963). Parece por tanto conveniente, introducir bajo estas condiciones, un factor de eficiencia.

Un reciente estudio (Carter y Robbins 1978) ha demostrado que la eficiencia del lavado puede ser mucho mayor de lo que se pensaba hasta hace poco tiempo y que el concepto LR habría sido utilizado con cierta liberalidad en los problemas salinos. Bernstein y Francois (1973) y Bernstein et al. (1975) demostraron que, para el caso de la alfalfa, el índice de salinidad de la zona de raíces inferior podía incrementarse significativamente por encima de su índice de tolerancia a la sal sin ocasionar efectos adversos serios en los rendimientos. Sus estudios indicaron que la salinidad del agua de riego era más importante que la del agua de drenaje para determinar el rendimiento de los cultivos. Estas investigaciones estimularon la investigación por el camino de tratar de determinar los efectos de la reducción de la fracción de lavado tanto en la producción como en la salinidad (Rhoades et al, 1973-74; Van Schilfgaarde) et al, 1974).

Surge así un nuevo concepto, "la mínima fracción de lavado" que podría aplicarse con efectividad en el riego por goteo o en el riego por aspersión, con una frecuencia bastante alta, así como en la mayor parte de los métodos de riego de superficie siempre que el intervalo entre riegos no sea muy grande. El intervalo entre riegos se convierte así en un factor muy importante. Si es muy grande el efecto osmótico se convertirá en dominante llegando a extremos críticos si el agua usada es de calidad baja.

Por último cabe destacar que el momento en que debe realizarse el lavado no parece algo fundamental, siempre que las tolerancias de los cultivos no alcancen valores críticos. El lavado puede realizarse en cada riego, cada pocos riegos, una vez al año, o después de periodos más largos. Independientemente del método usado es necesario un estudio detallado del suelo y cultivos. En la mayor parte de los casos se prefiere un lavado anual durante la época en la que no existe cultivo en la tierra (por ejemplo el invierno). La lluvia en algunos casos puede completar este lavado, pero en la mayor parte este fenómeno no es suficiente por sí mismo para realizar el lavado.

4) Cambios en los métodos de riego.

Los métodos de riego de superficie ya sea mediante canales, inundación, etc, no son normalmente lo suficientemente flexibles como para permitir cambios en la frecuencia del riego o en la profundidad del agua aplicada por

riego. Por ejemplo, en el caso del riego por canales no es generalmente posible reducir la profundidad del agua aplicada por debajo de los 80 a 100 mm. por riego. Como resultado de esto, regar más frecuentemente puede mejorar la posibilidad de disponer de más agua para el cultivo pero, sin embargo, puede desperdiciarse agua. Por tanto, si es aconsejable un cambio hacia riegos más frecuentes sería preferible utilizar un sistema de riego por aspersión o por goteo.

Con un sistema diseñado y administrado adecuadamente, los aspersores pueden aplicar el agua con gran uniformidad y con un tasa de aplicación suficientemente baja para evitar la escorrentía superficial. La profundidad del agua aplicada para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos -- más las necesidades del lavado pueden ser controladas fácilmente mediante -- ajustes en la duración y frecuencia de la aplicación. Los aspersores son usados en ocasiones durante la germinación y en las primeras etapas de crecimiento de las semillas en cultivos que son particularmente sensibles a la salinidad.

Cuando la calidad del agua es buena, los rendimientos con el riego por goteo son prácticamente iguales (o ligeramente superiores) a aquellos obtenidos con otros métodos en condiciones similares. Cuando la calidad del -- agua es baja los rendimientos alcanzados con el riego por goteo son sensiblemente mejores debido a que el suelo tiene una continua cantidad de agua y a -- la diaria reabsorción del agua perdida por evapotranspiración.

La escasa calidad del agua de riego en la zona objeto de estudio ha ría aconsejable, según lo dicho anteriormente, la utilización del método de -- riego por goteo. Los beneficios derivados de la utilización de este sistema -- de riego son dos: se reducen las necesidades brutas de agua de los cultivos, en el sentido de que se alcanzan eficiencias muy altas en la distribución y, -- en segundo lugar, la utilización de este sistema de riego amortiguaría los -- efectos de la salinidad en los rendimientos de los cultivos para un nivel dado de concentración salina. Concretamente en esta zona los cultivos rendirían como si no existiese el problema salino.

El gran inconveniente de este sistema es su coste, aunque no parece apropiado hablar de coste alto o bajo, sino más bien de rentabilidad (comparar los costes con los beneficios de la aplicación de dicho sistema).

A modo orientativo se ha tratado de ilustrar cuál sería el impacto de la aplicación de un sistema de riego por goteo en la zona objeto de estudio. Hay que hacer constar que tal sistema sólo es posible de aplicar a los frutales y productos hortícolas por razones puramente prácticas (densidad de tubos de riego), aunque países como Israel lo utilizan también en cultivos extensivos para lo cual todos los años deben levantar la instalación antes de la siembra, práctica que hoy en día no sería rentable.

El método seguido para estimar los beneficios de la implantación de este sistema de riego ha sido el mismo que el que se ha estado utilizando hasta ahora: la programación por metas. Las únicas variaciones introducidas hacen referencia a los datos:

1) Ya se ha mencionado que sólo se ha introducido este sistema de riego en frutales y hortalizas, por tanto, para el resto de los cultivos se utilizarán datos considerados al analizar la situación futura.

2) Se han reducido las necesidades brutas de agua al aumentar la eficiencia en la distribución al 95%, en vez del 65 % anterior (Cuadro 23).

3) La introducción de la hipótesis de reducción del agua necesaria permite hacer la suposición de un aumento de la superficie cultivada, que según el Sindicato de Riegos de Urdán y Rabal puede alcanzar el 10 % (en el modelo se aumentarán en este porcentaje todas las restricciones que incluyen el factor tierra: rotaciones, etc).

4) Para el nivel de salinidad existente la utilización del riego por goteo permite afirmar que el impacto de la sal en los rendimientos de los cultivos considerados es nulo, por lo que tanto las producciones máximas como los márgenes brutos unitarios de las mismas alcanzarían valores similares a los de una situación no salina (Cuadro 24).

Cuadro 23. Necesidades de agua de frutales y hortalizas en un sistema de riego por goteo (m^3/g).

Mes	Cultivo	
	Frutales	Huerta
Marzo		41,79
Abril	363,37	416,21
Mayo	713,47	713,47
Junio	1.292,10	1.903,05
Julio	1.975,16	2.396,53
Agosto	1.674,10	2.024,10
Septiembre	857,26	803,89
Octubre	261,79	224,95

Fuente: INITEC, 1981. Plan Hidrológico Nacional.

Cuadro 24. Rendimientos, producciones y márgenes futuros de los cultivos con riego por goteo

Cultivo	Rendimiento (kg/ha)	Producción máxima (t)	Margen bruto (miles de pta/ha)
Trigo	4.758	23.253	57
Cebada	4.394	4.542	39
Maíz	5.524	27.822	52
Alfalfa	12.052	56.147	56
Manzano	24.914	4.232	383
Peral	14.644	3.714	323
Melocotonero	12.106	4.231	472
Albaricoquero	17.250	1.903	322
Patata	13.182	1.278	-
Espárrago	3.833	85	323
Lechuga	21.666	1.078	209
Tomate	34.500	3.629	82
Cebolla	46.130	3.781	134
Alcachofa	9.248	1.015	176

Fuente: Elaboración propia.

5) Se mantiene como hipótesis de futuro una reducción del agua disponible del 15 %.

La resolución se ha llevado a cabo como en los casos anteriores. Los resultados aparecen recogidos en el cuadro 25 comparándolos con los que se habían obtenido en el epígrafe anterior.

Aquellos cultivos en los que se ha aplicado el riego por goteo ven aumentada su superficie cultivada hasta el máximo posible. La reducción de las necesidades de agua y la enorme diferencia entre los márgenes brutos motivan que en estos cultivos se alcancen valores idénticos a los que se obtuvieron en ausencia de salinidad, incrementados en un 10 % como consecuencia de la hipótesis de aumentar la superficie disponible en ese mismo porcentaje. Únicamente el tomate y la alcachofa experimentan incrementos mayores, ya que en la situación no salina no alcanzaban la superficie máxima disponible para estos cultivos, puesto que la diferencia entre los márgenes brutos no era tan evidente. El factor agua sigue siendo el más restrictivo y por tanto es el condicionante mayor en la solución, salvo en los cultivos de trigo y cebada (ya se ha comentado anteriormente las consideraciones a este respecto) que aumentarían en el mencionado 10 %.

La superficie destinada a frutales y hortalizas, sin embargo, no agota el agua disponible. Existe, pues, un excedente de agua que, atendiendo a los márgenes brutos y a las necesidades hídricas de los cultivos restantes, se destinará principalmente a la alfalfa, y en segundo lugar al maíz que en esta situación vería reducida su superficie en casi un 40 % (la patata no se ha considerado puesto que no sería rentable al tener un margen bruto negativo).

La utilización del riego por goteo produciría unas pérdidas nulas en los cultivos en los que se aplique. Ahora bien, considerada la zona globalmente y, tomando como marco de referencia una situación no salina, las pérdidas serían alrededor de 337 millones de pesetas al cabo de 30 años. Las pérdidas totales acumuladas alcanzarían los 9.653 millones de pesetas, es decir 4.620 millones de pesetas menos que en el caso de no aplicar el riego por

goteo. Por tanto, esta última cifra puede considerarse como el beneficio total acumulado en los próximos 30 años debido a la utilización del riego por goteo.

Sin embargo, la rentabilidad del sistema no puede evaluarse si no se consideran los costes del mismo.

Existe una gran dificultad para obtener datos sobre costes de los diferentes sistemas de riego. Únicamente existen estimaciones de expertos en la materia no publicados. La única fuente de información obtenida ha sido

Cuadro 25. Superficies futuras de los cultivos bajo la hipótesis de riego por goteo.

Cultivo	Superficie futura sin riego por goteo (ha)	Superficie futura con riego por goteo (ha)
Trigo	4.443	4.887
Cebada	939	1.033
Maíz	2.824	2.271
Alfalfa	3.980	4.379
Manzano	123	169
Peral	184	253
Melocotonero	235	349
Albaricoquero	0	110
Patata	0	0
Espárrago	20	22
Lechuga	0	49
Tomate	0	99
Cebolla	0	81
Alcachofa	83	109
Margen bruto total (pta)	727×10^6	1.085×10^6

Fuente: Elaboración propia.

un documento de uso interno de la Universidad de California (1978). Los datos han sido contrastados con el Departamento de Suelos y Riegos del Servicio de Investigación Agraria (DGA) estando recogidos en el cuadro 26.

Cuadro 26. Costes del sistema de riego por goteo (pta/ha) (1)

		Costes anuales			
		Amortizaciones	Intereses	Impuestos	Total
Pozo de agua	55.597	2.224	2.224	1.112	5.560
Bomba	37.065	1.853	1.482	741	4.077
Sistema de goteo (tubos)	203.857	20.385	8.154	4.077	32.617
	296.520	24.463	11.861	5.930	42.254
(anuales)					
. Mano de obra	6.671				
. Energía	14.121				
. Reparaciones	<u>12.676</u>				
Total costes operativos	<u>33.470</u>				
Total costes anuales	<u>75.724</u>				

(1) Los datos originales vienen expresados en \$. Se ha fijado un cambio de 150 pta/\$ con el que se pretende recoger tanto el efecto inflación como el efecto depreciación del dólar.

Fuente: División of Agricultural Sciences. University of California (1978).

La infraestructura necesaria para este sistema de riego, no es permanente, sino que debe renovarse. Si atendemos a las amortizaciones la duración media del sistema (tubos de riego) es de 10 años, siendo diferente en el caso de la bomba o del pozo. Sin embargo se ha considerado que la instalación en su conjunto deja de ser operativa a los diez años.

El coste total del sistema para las 1.138 ha que según la solución, estarán ocupadas por frutales y hortalizas asciende a casi 1.200 millones de pta (de 1982). Suponiendo que se renueve la infraestructura a los 10 años y de nuevo a los 20 años, el coste total ascendería al cabo del horizonte temporal fijado a casi 3.600 millones de pesetas. El beneficio global, por tanto, del sistema serían alrededor de 1.020 millones de pesetas.

Como puede verse no se ha entrado a evaluar el proyecto de forma muy exhaustiva calculando por ejemplo el valor actual neto. Ello se debe a que, si bien es complejo hacer predicciones para un horizonte temporal bas-

tante lejano, resultaría prácticamente imposible calcular el rendimiento neto año por año. En primer lugar sería imposible calcular el margen bruto global cada año ya que no puede calcularse el caudal (variable fundamental para hacer predicciones de salinidad) año a año debido a la aleatoriedad. La constante variación de la inflación y de los tipos de interés no permiten hacer suposiciones a tan largo plazo sobre cuál puede ser la tasa de rentabilidad a considerar.

En definitiva, la forma de cálculo utilizada, si bien no está exenta de limitaciones, proporciona una aproximación válida al problema planteado.



IV. RESUMEN Y CONCLUSIONES

1. El problema

La salinidad del agua de riego y su acumulación en el suelo es un problema importante para la agricultura. Su origen es muy diverso aunque generalmente proviene de la meteorización de las rocas y minerales presentes en el suelo o subsuelo, no descartando tampoco, como una posible fuente salina, la acción del hombre. Existen fundamentalmente dos parámetros para medir la salinidad: el total de sólidos disueltos (TDS) y la conductividad eléctrica (CE). Ultimamente se prefiere utilizar este último.

La salinidad es un fenómeno existente en cualquier río que se analice. Sin embargo no puede hablarse de problema en su utilización como agua para el riego hasta que su CE no supere los 0,8 mmho/cm, pudiendo catalogar el problema como grave cuando supera los 3,0 mmho/cm. En ese intervalo los efectos negativos de la salinidad empiezan ya a notarse. En el consumo humano -- existe una correlación positiva con la litiasis y la hipertensión, aumento -- del consumo de jabones, aumento en el gasto en bebidas, etc.

En la industria provoca un mayor gasto en desincrustantes y en el mantenimiento de las instalaciones, etc. En la agricultura la salinidad ocasiona un descenso de los rendimientos de los cultivos tradicionales así como un aumento de las necesidades de agua de los mismos, aparte de efectos puramente químicos que pueden llegar a modificar el mapa agrícola de una determinada zona.

El trabajo se ha limitado a analizar los efectos de la salinidad en la agricultura desde una perspectiva económica. Se ha tratado de evaluar el impacto económico del fenómeno en términos de pérdidas de margen bruto en una zona determinada y para dos horizontes temporales (actualmente y dentro de 30 años).

La zona elegida para el estudio ha sido la que está regada por las acequias Urdán y Rabal, que toman sus aguas del río Gállego. La razón de la elección viene motivada por la disponibilidad de datos y por la relativamente elevada salinidad de estas aguas (superior a 2 mmho/cm de media). La superficie

regada por estas dos acequias alcanza las 14.183 ha, pertenecientes a la parte Norte del municipio de Zaragoza y a los municipios de Alfajarín, Nuez de Ebro, Pastriz, Puebla de Alfindén, Villafranca de Ebro y Villanueva de Gállego.

Se ha considerado un horizonte temporal de 30 años puesto que al cabo de este periodo el incremento de la concentración salina puede ser lo suficientemente importante como para producir pérdidas elevadas en la agricultura.

2. Metodología

La metodología fundamentalmente utilizada para analizar el problema se basa en las técnicas de la programación lineal, debido a la posibilidad de -- las mismas para poder introducir restricciones físicas, lo que les confiere -- una gran flexibilidad; tanto para describir la situación agrícola actual de -- la zona así como para realizar estimaciones sobre una hipotética situación -- futura (análisis de sensibilidad).

Las técnicas tradicionales de programación lineal se basan en la optimización de un único objetivo (ya sea maximización o minimización). Esto supone una seria limitación puesto que generalmente cualquier decisor está más interesado en encontrar un equilibrio entre objetivos que entran en conflicto que en optimizar un único objetivo. De ahí que se ha preferido utilizar la -- programación por objetivos (goal programming), ya que permite la optimización de varios objetivos que entran en conflicto entre sí y facilita trabajar con una mayor flexibilidad. En la vida real la disponibilidad de los recursos no es tan rígida como aparece en la programación lineal tradicional (el incumplimiento de una restricción trae como consecuencia que el problema tiene una solución no posible).

En síntesis, los pasos que se han seguido en la construcción del modelo de programación por objetivos son:

1. Se ha desarrollado un modelo matemático donde se enumeran los objetivos a optimizar, así como las restricciones consideradas para la solución de un determinado problema.

regada por estas dos acequias alcanza las 14.183 ha, pertenecientes a la parte Norte del municipio de Zaragoza y a los municipios de Alfajarín, Nuez de Ebro, Pastriz, Puebla de Alfindén, Villafranca de Ebro y Villanueva de Gállego.

Se ha considerado un horizonte temporal de 30 años puesto que al cabo de este periodo el incremento de la concentración salina puede ser lo suficientemente importante como para producir pérdidas elevadas en la agricultura.

2. Metodología

La metodología fundamentalmente utilizada para analizar el problema se basa en las técnicas de la programación lineal, debido a la posibilidad de -- las mismas para poder introducir restricciones físicas, lo que les confiere -- una gran flexibilidad; tanto para describir la situación agrícola actual de -- la zona así como para realizar estimaciones sobre una hipotética situación -- futura (análisis de sensibilidad).

Las técnicas tradicionales de programación lineal se basan en la optimización de un único objetivo (ya sea maximización o minimización). Esto supone una seria limitación puesto que generalmente cualquier decisor está más interesado en encontrar un equilibrio entre objetivos que entran en conflicto que en optimizar un único objetivo. De ahí que se ha preferido utilizar la -- programación por metas (goal programming), ya que permite la optimización de varios objetivos que entran en conflicto entre sí y facilita trabajar con una mayor flexibilidad. En la vida real la disponibilidad de los recursos no es -- tan rígida como aparece en la programación lineal tradicional (el incumpli-- miento de una restricción trae como consecuencia que el problema tiene una so lución no posible).

En síntesis, los pasos que se han seguido en la construcción del modelo de programación por objetivos son:

1. Se ha desarrollado un modelo matemático donde se enumeran los objetivos a optimizar, así como las restricciones consideradas para la solución de un determinado problema.

2. Se han especificado los niveles que se desean alcanzar para cada objetivo.
 3. Se han incluido variables de desviación negativas y positivas para todas y cada una de las restricciones y de los objetivos.
 4. Se han especificado niveles de prioridad para cada objetivo.
 5. Finalmente se ha establecido la función de ajuste o vector de desviaciones a minimizar lexicográficamente.
3. Descripción de la situación actual y estimación de las pérdidas actuales

El objetivo planteado en la primera parte del trabajo fue doble: 1) la construcción de un modelo que permitiese describir la realidad actual y, 2) - la determinación del coste actual de la salinidad en términos de pérdida de margen bruto global.

3.1. El modelo

Tomando siempre como marco de referencia la programación por metas y considerando como variables la superficie ocupada por los diferentes cultivos de la zona, se han considerado tres objetivos:

- 1) Minimizar el agua destinada a riego.
- 2) Maximizar el margen bruto global.
- 3) Minimizar la mano de obra utilizada

Sujetos a dos tipos de restricciones:

1) Un conjunto de restricciones consideraban el factor tierra. La superficie total de la zona no es ilimitada, por lo tanto se definió una restricción donde se trataba de ajustar la superficie total dada por la solución a la existente en la realidad. Además se formuló otra serie de restricciones que trataban de recoger los hábitos de rotación de cultivos seguidos por los agricultores de la zona.

8) Necesidades de mano de obra para cada cultivo.

9) Disponibilidades de mano de obra en la zona.

Como datos actuales se han considerado las medias de 1980, 1981 y 1982, debido a que la utilización de los datos correspondientes a un único año podían no ser representativos, puesto que factores climáticos, económicos, etc., pueden condicionar los valores de un año. La utilización de las medias trató de amortiguar este efecto.

Introducidos estos datos en el modelo, el procedimiento usado para la resolución fue el "método lineal secuencial" que consiste en aplicar el simplex pero en un modo interactivo para resolver una secuencia de problemas de programación lineal. Para este problema en concreto se minimizaron en primer lugar las necesidades de agua sujetas al conjunto de restricciones, posteriormente se maximizó el margen bruto global, y por último se minimizó la mano de obra utilizada, teniendo en cuenta en cada etapa los resultados obtenidos en la etapa anterior. Como soporte informático se ha utilizado el programa Minos 5.0, especialmente diseñado para problemas no lineales, tratando el problema lineal como un caso particular.

Los resultados obtenidos en esta primera fase permiten sacar las siguientes conclusiones:

1) El agua disponible es un factor limitante en el mes de Julio - debido a que el caudal es menor en este mes que en el resto del año y es en este mes cuando los cultivos necesitan mayores cantidades de agua.

2) El margen bruto global obtenido es precisamente el que se obtiene en la realidad, así como la mano de obra empleada.

3) La superficie total ocupada sólo se desvia en un 0,02 % de la real. Por tanto puede afirmarse que en conjunto el modelo describe fielmente la realidad.

4) A nivel de cultivos individuales la desviación de la solución aportada por el modelo y la realidad es más acusada.

La explicación de este fenómeno se debe a que se realiza un proceso de optimización. En este sentido, es lógico que las variables adopten valores extremos (ya sean superiores o inferiores) dependiendo de cuáles sean las necesidades de agua y mano de obra y el margen bruto de cada cultivo. De todas formas si en vez de hablar de cultivos individuales nos referimos a grupos de cultivos (cereales, frutales, hortalizas, etc.) las desviaciones no son tan acusadas.

En definitiva, el modelo construido y la metodología utilizada describen con bastante exactitud la realidad existente en la zona que es precisamente el objetivo de la primera parte del estudio.

3.2. Impacto económico actual de la salinidad

Utilizando la metodología expuesta se pasó a continuación a evaluar las pérdidas económicas actuales debidas a este fenómeno. Se consideró por tanto que el problema salino no era algo nuevo, sino que se había ido gestando durante años y que dados los niveles existentes en la actualidad los efectos en la agricultura podían ser ya notables.

Unicamente se ha considerado un cambio en los rendimientos con respecto al modelo anterior puesto que se está representando el mismo horizonte temporal. El cálculo de los rendimientos actuales que se obtendrían si no existiese salinidad se realizó de la siguiente forma:

a) Se tomó como punto de partida los rendimientos reales que se estaban obteniendo.

b) Se calculó el nivel de salinidad del agua de riego para los tres años considerados, así como la salinidad media de los tres años.

c) A partir de las tablas publicadas por la FAO donde se recogen los niveles de salinidad que provocan un descenso en los rendimientos de los cultivos de un 10, 25 y 50 % se calcularon unos factores de corrección por los que había que multiplicar los rendimientos actuales (que implícitamente recogen ya el efecto salino) para obtener los rendimientos que se obtendrían en ausencia de dicho efecto.

Este incremento de los rendimientos provoca por un lado un incremento del margen bruto en el sentido de que aumenta el ingreso, pues se obtiene un aumento de la producción. Los costes no varían puesto que el agricultor utilizará por hectárea la misma cantidad de semillas, abonos y fertilizantes ya que no sabe a priori qué rendimientos va a obtener. No se ha tomado en consideración la variación de los precios de los productos, es decir, se ha asumido la hipótesis de precios constantes.

Todos los cambios fueron introducidos en el modelo y se resolvió como en el caso anterior. De la solución obtenida pueden deducirse las siguientes conclusiones:

1) El margen bruto global que se obtendría sería 307 millones de pta/año superior al que actualmente se está obteniendo, por tanto esta cifra puede considerarse como las pérdidas actuales debidas a la salinidad del agua de riego.

2) El agua sigue siendo el factor limitante más importante y por tanto el condicionante mayor de la solución obtenida.

3) Frutales y huerta, que son los cultivos más sensibles a la salinidad, experimentan un incremento mayor en los rendimientos y por consiguiente en el margen bruto que el resto de los cultivos. Ello motiva el que alcancen la mayor superficie posible, limitada sólo por la producción o bien por las costumbres de rotación.

4) Maíz y alfalfa ocuparían una superficie menor a la actual puesto que sus necesidades de agua son similares a las del resto de los cultivos pero su margen bruto es mucho menor.

5) La superficie ocupada por el trigo permanecería constante porque no requiere agua en el mes de Julio y no se ve afectada por la salinidad existente, al ser tolerante a la sal. La cebada, de parecidas características al trigo pero con un margen menor, duplica su superficie debido a que el margen bruto global no es tan restrictivo como en el caso anterior.

4. Estimación de las pérdidas futuras debidas a la salinidad

El objetivo que se planteó en esta segunda parte fue tratar de realizar una previsión de lo que podía ocurrir en el futuro si continuaba la tendencia actual a la salinización. El proceso seguido para la estimación de las pérdidas futuras fue similar al caso anterior, con la diferencia de que en este caso podía estimarse cuál iba a ser el nivel futuro de salinidad. Por tanto un paso previo fue predecir dicho nivel de salinidad.

Para la realización de dicha estimación se tuvo que tener en cuenta -- que el proceso de salinización no es constante sino que presenta cierta varia bilidad condicionada por el caudal del río (a mayor caudal menor concentración salina), por la estación en la que nos encontremos (generalmente la salinidad es diferente en las épocas de riego de las épocas de no riego) y por las condiciones climáticas (sobre todo en cuanto a nivel de precipitación) de la zona.

Los datos que se pudieron obtener fueron:

1) Datos medios mensuales de la conductividad eléctrica en la acequia de Urdán desde Octubre de 1974 hasta Septiembre de 1983.

2) Datos medios mensuales del caudal del río Gállego en Ardisa (unos 50 km al norte de dicha acequia) para el mismo periodo de tiempo.

Aparentemente estos datos no parecían coherentes puesto que las mediciones no habían sido realizadas en el mismo lugar, sin embargo fueron los -- únicos datos disponibles. De todas formas, y en este caso concreto, no se desvirtuó la relación caudal-concentración salina puesto que las aportaciones de sales entre estos dos puntos de medición habían sido relativamente constantes a lo largo de los últimos años.

Con estos datos se construyeron dos tipos de regresiones para hacer la predicción: uno con datos anuales (año hidrológico: Octubre-Septiembre) y -- otro con datos mensuales, y se escogió la mejor regresión de cada tipo con el fin de comparar resultados.

La mejor regresión teniendo en cuenta los datos anuales (desde el punto de vista estadístico) incluía como variables independientes, el tiempo y el caudal. La primera con coeficiente positivo y la segunda con coeficiente negativo, tal como se esperaba a priori. La variable tiempo no era significativa, sin embargo, debía considerarse puesto que el objetivo perseguido era analizar la tendencia de la salinización. La regresión era conjuntamente significativa con un $R^2 = 0,70$ y ausencia de autocorrelación. El modelo mostraba que el incremento anual de la concentración salina era de 0,036 mmho/cm. de CE.

El proceso de estimación con datos mensuales resultó más complejo, debido a que en este caso tenía validez la introducción de variables retardadas. Por tanto se introdujeron en el modelo la concentración salina y el caudal del periodo anterior (esta última variable recogía el desagüe del agua no utilizada para riego en el mes anterior). Además se introdujeron una serie de variables ficticias que trataban de recoger el componente estacional y que posteriormente se sustituyeron por una única variable que permitía diferenciar entre meses de riego y de no riego. El mejor modelo en este caso, incluía las variables tiempo, caudal del mes y caudal del mes anterior (todos ellos con los signos correctos), la mencionada variable ficticia y otra variable ficticia que trataba de recoger los efectos aislados provocados por anómalas variaciones en los datos. Individualmente todas las variables eran significativas así como el modelo en su conjunto. El coeficiente de determinación era ligeramente más alto (0,72) que en el caso anual y la tendencia mensual a la salinización era de 0,0023 mmho/cm, lo que equivalía a una tendencia anual de 0,028 mmho/cm.

Los resultados obtenidos fueron muy parejos, optándose por utilizar la media de las dos tendencias (0,032 mmho/cm).

Para determinar el nivel futuro de salinidad se tomó el modelo anual puesto que el error en la predicción para un período $t + 30$ era inferior que para un período $t + 360$. Considerando que el caudal se reducirá en estos 30 años algo más del 17 % (comparando la situación actual con la de hace 30 años y extrapolando esta relación al futuro) el nivel de salinidad esperado alcanzó los 3,05 mmho/cm.



Obtenido este nivel, la evaluación de las pérdidas futuras se realizó siguiendo un procedimiento similar al utilizado para evaluar las pérdidas actuales, estableciendo las siguientes hipótesis de futuro:

1) Se definieron dos escenarios futuros: en el primero no se consideró ninguna variación respecto a la situación actual, salvo la debida exclusivamente a la salinidad, y en el segundo se introdujo una reducción del agua disponible en un 15 %.

2) Se mantuvo la constancia de precios de productos y factores en el futuro.

3) A partir de las tablas de la FAO se determinó el descenso relativo de los rendimientos correspondiente al nivel de salinidad obtenido así como los rendimientos absolutos futuros, modificando a continuación las producciones y los márgenes brutos.

4) Se suprimieron las restricciones relacionadas con la producción mínima (que acotaban inferiormente a la superficie) puesto que el objetivo ya no era describir una situación actual, sino que trataba de predecir una hipotética situación futura, en la que puede haber cultivos que desaparezcan dependiendo de su sensibilidad a la sal y sus necesidades de agua.

5) Se mantuvieron constantes las necesidades de agua de los cultivos.

La forma de resolución fue la utilizada a lo largo del presente trabajo. Los resultados obtenidos permiten obtener las siguientes conclusiones:

1) Al comparar los dos escenarios propuestos cabe destacarse que la reducción del caudal produce una disminución de la superficie total cultivada que afecta exclusivamente al maíz, debido principalmente a su bajo margen bruto y a sus elevadas necesidades de agua.

2) Si ahora se compara cualquiera de los dos escenarios (puesto que son prácticamente idénticos) con una situación no salina, se puede concluir que:



a) Trigo, cebada y espárrago, que no ven afectados sus rendimientos por el nivel de salinidad alcanzado, ocuparían en el futuro la misma superficie que actualmente.

b) La desaparición de las restricciones que garantizaban una superficie mínima para cada cultivo motivarían la desaparición de la patata, albaricoque, lechuga, tomate y cebolla. El maíz vería aumentada su superficie ocupando, sin embargo, la superficie que le dejaron el resto de los cultivos para cubrir el posible excedente de agua (de ahí que el maíz sería el único afectado por la reducción del agua disponible).

c) El resto de los frutales ocuparían la máxima superficie disponible. Únicamente la superficie dedicada al melocotón desciende debido a la reducción del límite superior del espacio de soluciones, consecuencia a su vez de su mayor sensibilidad a los componentes salinos del agua de riego.

d) Aparte del espárrago, la alcachofa, el cultivo hortícola con mayor margen bruto a pesar de su sensibilidad a la sal, alcanzaría la mayor superficie posible, cubriendo la superficie dejada por el resto de hortícolas.

e) La alfalfa vería también aumentada su superficie hasta el máximo posible, completando el excedente de agua provocado por la desaparición de los cultivos mencionados anteriormente.

f) La reducción de la superficie dedicada a frutales y hortalizas provoca una disminución de la mano de obra necesaria en la zona.

g) Las pérdidas anuales estimadas al cabo de los 30 años para cada uno de los escenarios se elevan a 633 millones de pesetas (de 1982) si no existiese reducción de caudal y a 695 millones de pesetas (de 1982) caso de que hubiera reducción de caudal. Suponiendo que la evolución de las pérdidas sigue una progresión geométrica las pérdidas acumuladas totales al cabo de los 30 años ascenderían para cada escenario a 13.400 y 14.270 millones de pesetas (de 1982) respectivamente.

5. Control de la salinidad

Entre las numerosas posibilidades existentes para controlar la salinidad del agua de riego se ha tenido en cuenta en este estudio el cambio en los métodos de riego.

Se ha comprobado que cuando la calidad del agua es buena los rendimientos obtenidos con el riego por goteo son prácticamente iguales (o incluso ligeramente superiores) a aquellos obtenidos con otros métodos en condiciones similares; ahora bien, cuando el agua es de baja calidad (salinidad) los rendimientos alcanzados con el riego por goteo son sensiblemente mejores debido a que el suelo recibe una cantidad constante de agua y al lavado casi continuo de las sales acumuladas en el suelo por efecto de la evapotranspiración que hace que, al contrario que en otros métodos cuya frecuencia de riego es menor, la solución del suelo en la zona de raíces de los cultivos tenga una salinidad similar a la del agua de riego.

Teniendo esto en cuenta se trató de completar el estudio con un análisis sobre cuál sería el impacto en la zona de la puesta en funcionamiento de un sistema de riego por goteo, aplicado únicamente a frutales y hortalizas, puesto que la instalación para cultivos extensivos como cereales, maíz y alfalfa resultaría excesivamente compleja y costosa. Las ventajas de este sistema son principalmente dos:

1. Aumento de la eficiencia del riego, lo que reduciría las necesidades hídricas de los cultivos.
2. Aumento de la tolerancia a la salinidad del agua de riego de los distintos cultivos. Concretamente el nivel de salinidad futuro no afectaría a los rendimientos.

Además la reducción de las necesidades de agua de los cultivos permitiría aumentar la superficie cultivada que se ha estimado que podría alcanzar un valor próximo al 10 %.

Se introdujeron todas estas variaciones en el modelo futuro bajo la hipótesis de reducción del agua disponible con el fin de obtener cuál sería la hipotética situación futura si se regara por goteo la superficie dedicada a frutales y hortalizas en la zona.

Los resultados obtenidos mostraron que en aquellos cultivos donde se iba a aplicar el riego por goteo la superficie ocupada sería la misma que en ausencia de salinidad aumentada en el mencionado 10 %; la superficie dedicada a cebada y trigo se incrementa en el mismo porcentaje. Alfalfa y maíz trataban de ocupar la superficie excedente hasta completar las disponibilidades de agua.

Considerada la zona globalmente, tomando como marco de referencia una situación no salina, las pérdidas alcanzarían los 337 millones de pesetas/año (de 1982) al cabo de los 30 años. Las pérdidas totales acumuladas alcanzarían los 9.650 millones de pesetas (de 1982), o lo que es lo mismo 4.620 millones de pesetas (de 1982) menos que en el caso de no aplicar riego por goteo. En definitiva, esta cifra podría considerarse como el beneficio total acumulado en los próximos 30 años debido a la utilización del riego por goteo.

Se estimó a continuación el coste total que supondría la instalación de este sistema. Se consideraron en primer lugar unos costes de infraestructura que incluía el pozo de agua, la bomba para impulsar el agua y los tubos de distribución. Derivados de estos costes se consideraron unos costes de carácter anual (amortizaciones, intereses e impuestos). Además se tuvieron en cuenta otros costes anuales que reciben el nombre de costes operativos (mano de obra, energía, reparaciones, etc). Se introdujo la hipótesis de que la vida útil de la instalación era de 10 años y que había que reponerla íntegramente.

El coste total estimado para las 1.138 ha, que según el modelo estarían ocupadas por frutales y hortalizas, ascendió a 3.600 millones de pesetas (de 1982). Por tanto el beneficio estimado por la utilización de este sistema de riego rondaría los 1.020 millones de pesetas (de 1982).

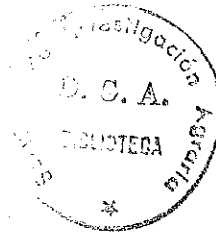
6. Limitaciones

Los resultados de este estudio vienen, por supuesto, condicionados por las hipótesis asumidas:

1) En primer lugar, hubiese sido deseable la utilización del margen neto como medida de beneficio ya que el modelo ha incentivado a los cultivos intensivos en mano de obra en una proporción mayor a lo que ocurriría realmente. Este hecho, si bien no es importante actualmente, si podría condicionar en el futuro el mapa agrícola de la zona.

2) La metodología empleada está siendo últimamente revisada por diversos autores, desarrollándose nuevos algoritmos y formas de resolución. La forma de resolución escogida a pesar de que puede parecer simplista, parece la más adecuada sobre todo si tenemos en cuenta dos condicionantes importantes: 1) el programa de ordenador usado tiene unas serias limitaciones en cuestiones como programación entera y paramétrica que, hubiese sido interesante aplicar para conocer relaciones de sustitución entre los cultivos y 2) el problema concreto planteado, donde hay que tener en cuenta que no sólo se buscaba una solución óptima sino que el objetivo previo era la descripción de una realidad existente. Desde este último punto de vista el objetivo parece haberse conseguido con la forma de resolución propuesta.

3) La constancia de los valores económicos (precios de productos y factores) y de la tecnología limita en gran medida la perspectiva futura que se ha tratado de recoger. Sin embargo, hay que recordar que no se pretendía dar una visión exacta de lo que ocurrirá dentro de 30 años (al igual que nadie podría predecir hace 30 años con exactitud la situación actual de la agricultura). Unicamente se ha pretendido llamar la atención sobre lo que puede ocurrir en el futuro si se mantiene una situación actual al incrementarse el nivel de salinidad del agua utilizada para riego.



7. Conclusiones

El estudio ha tratado de reflejar cuál será la hipotética situación de una zona determinada desde el punto de vista económico si se mantiene la actual tendencia de salinización de sus aguas de riego. De todos los resultados obtenidos se pueden entresacar las siguientes conclusiones:

1) La situación actual de la agricultura de la zona no es óptima. Cultivos rentables como pueden ser frutales y hortalizas ocupan superficies menores a los que serían deseables. La razón principal es el riesgo que conllevan dichos cultivos mucho más sensibles a factores climáticos.

2) El nivel actual de la salinidad, si bien no es grave, está produciendo ya en estos momentos pérdidas considerables (más de 300 millones de pesetas por año). En una situación hipotéticamente no salina los cultivos más rentables ocuparían una mayor superficie que en la actualidad en contraposición a cultivos tradicionales (cereales, maíz y alfalfa).

3) La situación futura, de seguir manteniéndose la tendencia de salinización puede llegar a ser grave, llegándose a perder más del 40 % de lo que debería producir la zona.

4) Se impone por tanto una concienciación del problema, por parte de los agricultores con el fin de tomar medidas para controlar la salinidad futura puesto que es un problema irreversible y la única solución es amortiguar sus efectos mediante, por ejemplo, la utilización de técnicas de riego más eficientes, el cambio en las costumbres agrícolas, una mayor frecuencia de riego, una mejor selección de los cultivos atendiendo a la tolerancia de los mismos a la salinidad, o incluso la utilización de aguas de riego de menor salinidad a través de la construcción de canales o acequias con sus tomas de agua en la parte alta o media de la cuenca del Gállego donde tanto su salinidad actual como futura es despreciable (valores de CE inferiores a 0.5 mmho/cm).

REFERENCIAS

- ALBERTO F, ARAGUES R, FACI J, FERRERES E, MACHIN J, HENDERSON D.W., TANJI KK. Salinity studies in the Ebro Basin. Documento de uso interno.
- ARAGUES R, ALBERTO., 1983. La salinización. Ponencia presentada al V Salón Monográfico del Agua. Zaragoza, 1983.
- BARNETT D, BLAKE B, McCARL B.A., 1982. Goal programming via multidimensional scaling applied to senegalese subsistence farms. American Journal of Agricultural Economics, 64: 720-727.
- BERNAL C.T., BINGHAM F.T., OERTLI J., 1974. Salt tolerance of Mexican wheats II: Relation sodium chloride and length of growing. Soil Sci. Soc.-Am. Proc., 38: 777-780.
- BERNSTEIN L, FIREMAN M, REEVE R.C., 1955. Control of salinity in the Imperial Valley. USDA 41 (4): 15 p.
- BERNSTEIN L, FIREMAN M., 1957. Laboratory studies on salt distribution in furrow irrigated soil with special reference to the pre-emergence period. Soil Science, 83: 249-263.
- BERNSTEIN L, FRANCOIS L.E., 1973. Leaching requirement studies: sensitivity to alfalfa to salinity of irrigation and drainage waters. Soil Sci.-Soc. Am. Proc., 37: 931-943.
- BERNSTEIN L, FRANCOIS L.E., CLARK M., 1974. Interactive effects of salinity and fertility on yields grains and vegetables. Ag.J., 66: 412-421.
- BERNSTEIN L., 1975. Effects of salinity and sodicity on plant growth. Annual Review of Phytopathol., 13: 295-312.

- BERNSTEIN L., FRANCOIS L.E., CLARK R.A., 1975. Minimal leaching with varying roots depths of alfalfa. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39: 112-115.
- BRESLER E, McNEAL B.L., CARTER D.L., 1982. Saline and sodic soils: Principles-Dynamics-Modeling. Advances Series in Agricultural Sciences, 10.- Springer-Verlag, Berlin.
- CALLINAN B.J., NEBSTER R.G. Economic and social aspects of saline water use and management. En: *Salinity and water Use*. 227-242. Taluma T, Philip J.R.
- CARTER D.L., ROBBINS C.N., 1978. Salt outflows from new and old irrigated lands. *Soil Sci. Am. Proc.*, 47: 627-632.
- CAVERO F.J., DELGADO I., 1984. Secano y regadío en Aragón: una orientación cuantitativa. En: *Anales*, 141-173. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.- Madrid.
- CAZAR. Renta Municipal de Aragón. 1981.
- CHARNES A, COOPER W.W. 1961. Management models and industrial applications of linear programming, Vol. 1. John Wiley & sons. New York.
- COHON J.L. 1978. Multiobjective programming and planning. Academic Press. New York.
- CUNNINGHAM R.B., MORTON R. 1983. A statistical method for the estimation of trend in salinity in the River Murray. *Australian Journal of Soil Research*, 21: 123-132.
- DAVER J.P., KRUEGER R.J., 1977. An iterative approach to goal programming.- *Op1. Res. Q.*, 28: 671-681.
- DIELEMAN P.J., 1963. Reclamation of salt affected soils in Iraq. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen. Public. 11: 175 p.

- DONEEN L.D., 1971. Irrigation practice and water management. Irrigation and Drainage Paper, 1. FAO. Roma.
- DOORENBOS J., PRUITT W.O. 1975. Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper, 24. FAO. Roma.
- DUDEK D.J., HORNER G.L., 1985. Integrated physical-economic resource analysis: a case study of the San Joaquin Valley. Research Agreement. Economic Research Service. U.S. Department of Agriculture. Oklahoma.
- FACI J., 1986. Ventajas e inconvenientes de los diferentes sistemas de riego. Documento personal.
- FAO. 1976. Water quality for agriculture. Irrigation and Drainage Paper, 29. Roma.
- FAPOHUNDA H., HILL R., 1981. River basin hidro-salinity-economic modeling. Journal of the irrigation and drainage division. March, 1981: 53-69.
- FLINN J.C., JAYASORIYA S., KNIGHT C.G., 1980. Incorporating multiple objectives in planning models of low-resource farms. Australian Journal of Agricultural Economics, 24: 35-45.
- GASSON R., 1973. Goals and values farmers. Journal of Agricultural Economics, 24: 521-537.
- HARPER W.H., EASTMAN C., 1980. An evaluation of goal hierarchies for small farm operations. American Journal of Agricultural Economics, 62: 742-747.
- HEADY E., NICOL K., WADE J., 1981. Economic cost and trade-offs in improving water quality and nonpoint pollution through agriculture: an interrelational approach. En: Salinity and water resources, 245-270. Dan Yaron editors. New York.
- HIRSCH R.M., SLACK J.R., SMITH R.A. 1982. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. Water Resources Research 18 (1): 107-121.

- DONEEN L.D., 1971. Irrigation practice and water management. Irrigation and Drainage Paper, 1. FAO. Roma.
- DOORENBOS J., PRUITT W.O. 1975. Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper, 24. FAO. Roma.
- DUDEK D.J., HORNER G.L., 1985. Integrated physical-economic resource analysis: a case study of the San Joaquin Valley. Research Agreement. Economic Research Service. U.S. Department of Agriculture. Oklahoma.
- FACI J., 1986. Ventajas e inconvenientes de los diferentes sistemas de riego.- Documento personal.
- FAO. 1976. Water quality for agriculture. Irrigation and Drainage Paper, 29.- Roma.
- FAPOHUNDA H., HILL R., 1981. River basin hidro-salinity-economic modeling.- Journal of the irrigation and drainage division. March, 1981: 53-69.
- FLINN J.C., JAYASORIYA S., KNIGHT C.G., 1980. Incorporating multiple objectives in planning models of low-resource farms. Australian Journal of Agricultural Economics, 24: 35-45.
- GASSON R., 1973. Goals and values farmers. Journal of Agricultural Economics, 24: 521-537.
- HARPER W.H., EASTMAN C., 1980. An evaluation of goal hierarchies for small farm operations. American Journal of Agricultural Economics, 62: 742-747.
- HEADY E., NICOL K., WADE J., 1981. Economic cost and trade-offs in improving water quality and nonpoint pollution through agriculture: an interrelational approach. En: Salinity and water resources, 245-270. Dan Yaron editors. New York.
- HIRSCH R.M., SLACK J.R., SMITH R.A. 1982. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. Water Resources Research 18 (1): 107-121.

- IGNIZIO J.P., 1976. Goal programming and extensions. Lexington Books. Massachusetts.
- IGNIZIO J.P., 1982. Linear programming in single - & múltiple-objetive systems. Prentice-Hall Inc.
- IJIRI Y., 1965. Management goals and accounting for control. North Holland Publishing Company. Amsterdam.
- INITEC., 1981. Plan Hidrológico Nacional (Primera Fase). Anejos 9 y 12.
- LAUGHLING D., LACEWELL R., 1980. The Agricultural benefits of salinity control on the Red River of Texas and Oklahoma. Technical report. 112.- Texas Water Resources Institute.
- LAUGHLING D., LACEWELL R., 1981. Agricultural benefits of salinity control on the Red River. Western Journal of Agricultural Economics. December, 1981: 195-206.
- LEE S.M. 1972. Goal programming for decision analysis. Auerbach Publishers, Philadelphia.
- MAAS E.V., HOFFMAN G.J., 1977. Crop salt tolerance-current assessment. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 103: 115-134.
- MOORE C.V., SNYDER J.H., SUN P., 1974. Effects of Colorado River quality and supply on irrigated agriculture. Water Resources Research, 10(3): 137-144.
- MOORE C.V., 1981. Economic evaluation of irrigation with saline water within the framework of farm, methodology and empirical findings: a case study of Imperial Valley, California. En: Salinity in irrigation and water resources, 159-172. Dan Yaron editors. New York.
- MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y URBANISMO (MOPU)., 1979. Aforos 9. Cuenca del Ebro. Períodos 1974-75 y 1975-76.



- MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y URBANISMO (MOPU). Varios años. Análisis de calidad de aguas.
- MURTAGH B.A., SAUNDERS M.A., 1983. Minos 5.0 User's guide. Technical Report.- Stanford University. California.
- O'CONNOR D.J., 1976. The concentration of dissolved solids and river flow.- Water Resources Research 12(2): 279-294.
- PUIG E., CASADO C., 1984. Técnicas de cultivo de frutales en la región aragonesa. Documento de Trabajo 84/2. Servicio de Investigación Agraria.- Diputación General de Aragón.
- RAE A.N., 1974. A note on the solution of goal programming problems with pre-emptive priority. New Zealand. Opl. Res., 2: 234-239.
- RHOADES J.D., INGVALSON R.D., TUCKER J.M., CLARK M., 1973. Salts in irrigation drainage water 1: Effects of irrigation water composition, leaching fraction and time of year on the salt composition of irrigation drainage waters. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 37: 770-774.
- RHOADES J.D., OSTER J.D., INGVALSON R.D., TUCKER J.M., CLARK M., 1974. Minimizing the salt burdens of irrigation drainage waters. Journal of Environmental Quality, 3: 311-316.
- ROMERO C., REHMAN T., 1984. Goal programming and multiple criteria decision making in farm planning: an expository analysis. Journal of Agricultural Economics, 35(2): 177-190.
- SCOFIELD C.S., 1942. Pecos River joint investigation. Report of participating agencies, 263-334. U.S. National Resources Planning Board, Washington D.C.
- U.S. SALINITY LABORATORY STAFF. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S. Department of Agriculture. Handbook. 60: 160 p.

- VAN SCHILFGAARDE J., BERNSTEIN L., RHOADES J.D., RAWLING S.L., 1974. Irrigation management for salt control. Journal of the Irrigation and Drainage Division. 100: 321-337.
- WHEELER B.M., RUSSELL J.R.M., 1978. Goal programming and agricultural planning. *Op1. Res. Q.*, 28: 21-32.
- WOLMAN M.G., 1976. The Nation's Rivers. *Science*, 174: 905-918.
- YOUNG R.A., LEATHERS K.L., 1981. Economic impacts of Regional Saline Irrigation Return Flow Management Programs. En: *Salinity in Irrigation and Water Resources*: 201-214. Dan Yaron editors. New York.
- ZELENY M., 1982. Multiple criteria decision-making. McGraw-Hill. New York.



A N E J O I

SUPERFICIE DE REGADIO OCUPADA POR LOS CULTIVOS DE LA ZONA

Cuadro 1. Superficie de riego ocupada por los cultivos de la zona

Cultivo	1980	1981	1982	Superficie media
Trigo	4.046	3.847	4.024	3.972
Cebada	755	786	843	795
Avena	3	0	0	1
Centeno	0	0	0	0
Tranquillon	0	0	30	10
Arroz	132	0	0	44
Maíz	4.373	4.592	4.161	4.375
Patata temprana	34	34	34	34
Patata media	27	36	36	33
Patata tardía	26	25	25	25
Remolacha azucarera	1	1	1	1
Girasol	9	9	9	9
Cártamo	24	0	0	8
Soja	0	24	24	16
Clavel	2	2	2	2
Rosa	2	2	2	2
Otras flores	1	1	1	1
Maíz forrajero	7	7	7	7
Otras gramíneas	70	70	70	70
Alfalfa	3.564	3.395	3.786	3.582
Trebol	0	224	0	74
Esparceta	1	1	1	1
Veza para forraje	15	15	15	15
Nabo forrajero	7	7	7	7
Praderas polífitas	29	0	0	9
Col forrajera	0	29	29	19
Col y repollo	16	20	20	19
Berza	2	2	2	2
Espárrago	5	7	7	6
Apio	0	16	0	5
Lechuga	18	5	18	13
Escarola	3	3	3	3
Espinaca	3	15	3	7

Cultivo	1980	1981	1982	Superficie media
Acelga	15	5	15	12
Cardo	5	0	9	4
Achicoria	9	9	9	9
Sandia	4	4	5	5
Melón	9	11	10	10
Calabaza	4	4	4	4
Pepino	3	3	3	3
Berenjena	2	2	2	2
Tomate	31	31	33	31
Pimiento	4	4	5	4
Guindilla	2	2	0	1
Fresa y fresón	0	0	28	10
Alcachofa	29	32	8	23
Coliflor	10	10	3	8
Ajo	2	2	1	2
Cebolla	12	12	30	18
Cebolleta	0	0	9	3
Puerro	1	1	2	1
Remolacha mesa	0	0	7	2
Zanahoria	1	1	0	1
Rábano	0	0	1	1
Nabo y otras	0	0	0	0
Judía verde	13	13	3	10
Guisante verde	3	3	0	2
Haba verde	7	7	1	5
Otras hortalizas	8	8	3	6
Manzano	115	116	115	115
Peral	159	159	157	158
Membrillero	1	1	1	1
Níspero	2	2	2	2
Albaricoquero	68	68	68	68
Cerezo y guindo	15	15	15	15
Melocotonero	217	220	215	217
Ciruelo	18	18	18	18

Cultivo	1980	1981	1982	Superficie media
Chimbera	0	0	0	0
Almendro	14	14	14	14
Nogal	4	4	4	4
Manzano (prados naturales)	0	0	0	0
Viñedo (uva de mesa)	100	100	99	99
Viñedo (uva para pasas)	0	0	0	0
Olivar (aceituna de mesa)	0	0	0	0
Morera y otros	3	0	0	1
TOTAL REGADIO	14.183	14.187	14.180	14.183

Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Estadísticas de ocupación de superficie a nivel municipal (I T).

A N E J O I I

NECESIDADES MENSUALES DE AGUA DE LOS CULTIVOS

Cuadro 2. Necesidad mensual de agua para el trigo y la cebada

Mes	Días	ETo mensual (mm)	ETo propor. (mm)	KC	ET (mm)	Lluvia efectiva	Necesidades	
							Netas (mm)	Brutas (m ³ /ha)
Marzo	31	89	89	0,35	31,15	14,33	16,82	224,27
Abril	30	125	125	1,10	137,50	19,28	118,22	1.576,27
Mayo	31	157	157	1,15	180,55	29,99	150,56	2.007,47
Junio	15	180	90	0,70	63,00	9,82	53,18	709,07

Plantación: 1 Marzo

Recolección: 15 de Junio

Volumen de riego: 1.000 m³/ha

Eficiencia de la distribución: 0,75

Probabilidad de lluvia: 50 %

Fuentes: INITEC (1981). Plan Hidrológico Nacional.

Departamento de Suelos y Riegos del S.I.A. (DGA).

Elaboración propia.

Cuadro 3. Necesidad mensual de agua para el maíz

Mes	Días	ETo mensual (mm)	ETo propor. (mm)	KC	ET (mm)	Lluvia efectiva	Necesidades	
							Netas (mm)	Brutas (m ³ /ha)
Abril	30	125	125	0,26	32,50	15,48	17,02	226,93
Mayo	31	157	157	0,40	62,80	23,60	39,20	522,67
Junio	30	180	180	0,85	153,00	22,94	130,06	1.734,13
Julio	31	215	215	1,15	247,25	19,58	227,67	3.035,60
Agosto	31	182	182	1,15	209,30	16,61	192,69	2.569,20
Sept.	30	114	114	0,95	108,30	21,16	87,14	1.161,87
Octubre	31	70	70	0,70	49,00	20,63	28,37	378,27

Plantación: 1 de Abril

Recolección: 31 de Octubre

Volumen de riego: 1.000 m³/ha

Eficiencia de la distribución: 0,75

Probabilidad de lluvia: 50 %

Fuentes: INITEC (1981). Plan Hidrológico Nacional.

Departamento de Suelos y Riegos del S.I.A. (DGA).

Elaboración propia.

Cuadro 4. Necesidad mensual de agua para la alfalfa

Mes	Días	ETo mensual (mm)	ETo propor. (mm)	KC	ET (mm)	Lluvia efectiva	Necesidades	
							Netas (mm)	Brutas (m ³ /ha)
Marzo	31	89	89	0,95	84,55	18,18	66,37	884,93
Abril	30	125	125	0,95	118,75	19,93	98,82	1.317,60
Mayo	31	157	157	0,95	149,15	27,17	121,98	1.626,40
Junio	30	180	180	0,95	171,00	22,94	148,06	1.974,13
Julio	31	215	215	0,95	204,25	16,61	187,64	2.501,87
Agosto	31	182	182	0,95	172,90	13,86	159,04	2.120,53
Sept.	30	114	114	0,95	108,30	21,16	87,14	1.161,87
Octubre	31	70	70	0,95	66,50	21,88	44,62	594,93
Noviembre	30	35	35	0,95	33,25	17,77	15,48	206,40

Plantación: 1 de Marzo

Recolección: 30 de Noviembre

Volumen de riego: 1.000 m³/ha

Eficiencia de la distribución: 0,75

Probabilidad de lluvia: 50 %

Fuentes: INITEC (1981). Plan Hidrológico Nacional.

Departamento de Suelos y Riegos del S.I.A. (DGA).

Elaboración propia.

Cuadro 5. Necesidad mensual de agua para los frutales

Mes	Días	ETo mensual (mm)	ETo propor. (mm)	KC	ET (mm)	Lluvia efectiva	Necesidades	
							Netas (mm)	Brutas (m ³ /ha)
Abril	30	125	125	0,40	50,00	15,48	34,52	531,12
Mayo	31	157	157	0,60	94,20	26,42	67,78	1.042,78
Junio	30	180	180	0,80	144,00	21,25	122,75	1.888,47
Julio	31	215	215	0,95	204,25	16,61	187,64	2.886,75
Agosto	31	182	182	0,95	172,90	13,86	159,04	2.446,82
Sept.	30	114	114	0,90	102,60	21,16	81,44	1.252,97
Octubre	31	70	70	0,65	45,50	20,63	24,87	382,68

Plantación: 1 de Abril

Recolección: 31 de Octubre Volumen de

riego: 1.000 m³/ha

Eficiencia: 31 de Octubre

Probabilidad de lluvia: 50 %

Fuentes: INITEC (1981). Plan Hidrológico Nacional.

Departamento de Suelos y Riegos del S.I.A. (DGA).

Elaboración propia.



Cuadro 6. Necesidad mensual de agua para la patata

Mes	Días	ETo mensual (mm)	ETo propor. (mm)	KC	ET (mm)	Lluvia efectiva	Necesidades	
							Netas (mm)	Brutas (m ³ /ha)
Marzo	17	89	48	0,35	17,08	5,20	11,89	182,85
Abril	30	125	125	0,50	62,50	8,16	54,34	835,95
Mayo	31	157	157	0,80	125,60	15,18	110,42	1.698,70
Junio	30	180	180	1,15	207,00	17,69	189,31	2.912,49
Julio	31	215	215	1,15	247,25	16,29	230,96	3.553,26
Agosto	31	182	182	0,95	172,90	8,81	164,09	2.524,49

Plantación: 15 de Marzo

Recolección: 31 de Agosto

Volumen de riego: 1.000 m³/ha

Eficiencia de la distribución: 0,65

Probabilidad de lluvia: 50 %

Fuentes: INITEC (1981). Plan Hidrológico Nacional.

Departamento de Suelos y Riegos del S.I.A. (DGA).

Elaboración propia.

Cuadro 7. Necesidad mensual de agua para la huerta

Mes	Días	ETo mensual (mm)	ETo propor. (mm)	KC	ET (mm)	Lluvia efectiva	Necesidades	
							Netas (mm)	Brutas (m ³ /ha)
Marzo	17	89	48	0,35	17,08	13,12	3,97	61,03
Abril	30	125	125	0,45	56,25	16,71	39,54	608,27
Mayo	31	157	157	0,60	94,20	26,42	67,78	1.042,78
Junio	30	180	180	1,15	207,00	26,21	180,79	2.781,31
Julio	31	215	215	1,15	247,25	19,58	227,67	3.502,65
Agosto	31	182	182	1,15	209,30	16,61	192,69	2.964,44
Sept.	30	114	114	0,85	96,90	20,53	76,37	1.174,88
Octubre	31	70	70	0,60	42,00	20,63	21,37	328,83

Plantación: 15 de Marzo

Recolección: 31 de Octubre

Volumen de riego: 1.000 m³/ha

Eficiencia de la distribución: 0,65

Probabilidad de lluvia: 50 %

Fuentes: INITEC (1981). Plan Hidrológico Nacional.

Departamento de Suelos y Riegos del S.I.A. (DGA).

Elaboración propia.

A N E J O III

PRECIOS DE PRODUCTOS Y FACTORES

Cuadro 8. Precios de los productos (pta/kg)

Trigo	20,30
Cebada	16,50
Maíz	20,30
Alfalfa	10,10
Manzano	21,75
Peral	35,50
Melocotonero	50,65
Albaricoquero	26,11
Patata	12,00
Espárrago	180,00
Lechuga	18,24
Tomate	8,50
Cebolla	7,00
Alcachofa	18,00

Fuente: CAVERO F.J. y DELGADO I. (1984). Secano y regadío en Aragón: una -- orientación cuantitativa. INIA. Anales Economía y Sociología Agrarias 8, 141: 173.

Cuadro 9. Precios de las semillas

Trigo	35 pta/kg
Cebada	27 pta/kg
Maíz	390 pta/kg
Alfalfa	400 pta/kg
Patata	37 pta/kg
Espárrago	16 pta/peine
Lechuga	1.142 pta/ha (abonos, semillas..)
Tomate	5.200 pta/ha (abonos, semillas, plásticos, etc)
Cebolla	3.400 pta/kg
Alcachofa	10 pta/zueca

Fuente: CAVERO F.J. y DELGADO I. (1984). Secano y regadío en Aragón: una -- orientación cuantitativa. INIA. Anales Economía y Sociología Agrarias 8, 141: 173.

Cuadro 10. Precios de los abonos (pta/kg) y combustible (pta/h)

ABONOS	
8-24-8	27,84
12-12-24	26,00
0-14-7	14,32
9-18-27	27,83
15-15-15	27,41
8-15-15	22,74
5-15-15	17,43
Cloruro potásico	18,07
Superfosfato	10,30
Nitrato 33,5 %	26,54
Nitrato 26 %	22,15
Urea	32,39
COMBUSTIBLE	
Se considera un gasto de 360 pta/h	

Fuente: Cavero F.J. y Delgado I. (1984). Secano y regadío en Aragón: una --- orientación cuantitativa. INIA. Anales Economía y Sociología Agrarias 8, 141:173.



A N E J O I V

COSTES PROPORCIONALES DE LOS CULTIVOS

Cuadro 11. Coste proporcional del trigo

Concepto	Cantidad (kg/ha)	Precio (pta/kg)	Coste (pta/ha)
Semilla	212	35	7.420
Abonado de fondo (8-24-8)	400	27,84	11.136
Abonado cobertura (nitrato 33,5 %)	250	26,54	6.635
Combustible	20(1)	360(2)	7.200
1 Tratamiento			200
Mano de obra	36(1)	1.451(2)	6.530
TOTAL COSTE			39.121

Cuadro 12. Coste proporcional de la cebada

Concepto	Cantidad (kg/ha)	Precio (pta/kg)	Coste (pta/ha)
Semilla	203	27	5.481
Abonado de fondo (8-24-81)	300	27,84	8.352
Abonado de cobertura (nitrato 33,5 %)	250	26,54	6.635
Combustible	20(1)	360(2)	7.200
1 Tratamiento			200
Mano de obra	32(1)	1.451(2)	5.804
TOTAL COSTE			33.672

Cuadro 13. Coste proporcional del maíz

Concepto	Cantidad (kg/ha)	Precio (pta/kg)	Coste (pta/ha)
Semilla	21	390	8.190
Abonado de fondo (12-24-12)	700	26	18.200
Abonado de cobertura (nitrato 33,5 %)	400	26,54	10.616
Combustible	27(1)	360(2)	9.720
1 Tratamiento			800
Mano de obra	69(1)	1.451(2)	12.334
TOTAL COSTE			59.860

Cuadro 14. Coste proporcional de la alfalfa

Concepto	Cantidad (kg/ha)	Precio (pta/kg)	Coste (pta/ha)
Semilla	40	400	16.000
Abonado anual (0-14-7)	800	14,32	11.456
Combustible	45(1)	360(2)	16.200
2 Tratamientos			1.000
Mano de obra	116(1)	1.451(2)	21.040
TOTAL COSTE			65.696

Cuadro 15. Coste proporcional del manzano

Concepto	Cantidad (kg/ha)	Precio (pta/kg)	Coste (pta/ha)
Complejo 4-12-8	1.300	16,03	20.839
Nitrosulfato-amónico	500	21,99	10.995
12 Tratamientos	900(3)	2,6(4)	28.080
Amortización explotación (20 años)			6.180
Mano de obra	514(1)	1.451(2)	92.864
TOTAL COSTE			158.958

Cuadro 16. Coste proporcional del peral

Concepto	Cantidad (kg/ha)	Precio (pta/kg)	Coste (pta/ha)
Complejo 4-12-8	1.300	16,03	20.839
Nitrosulfato amónico	500	21,99	10.995
12 Tratamientos	1.000(3)	2,6(4)	36.720
Amortización explotación (25 años)			7.880
Mano de obra	662(1)	1.451(2)	120.433
TOTAL COSTE			196.867

Cuadro 17. Coste proporcional del melocotonero

Concepto	Cantidad (kg/ha)	Precio (pta/kg)	Coste (pta/ha)
Estiércol			30.000
Planta	400(5)	243(6)	98.800
Abonado (15-15-15)	1.600	27,41	43.856
16 Tratamientos	300(3)	2,5(4)	12.000
COSTE EXPLOTACION			184.656
Amortización coste explotación (13 años)			14.204
Complejo (4-8-12)	900	16,03	14.427
Nitrosulfato amónico	400	21,99	8.796
7 Tratamientos	800(3)	2,5(4)	14.000
Aplicación Quelatos de Fe			13.000
Mano de obra	424(1)	1.451(2)	76.903
TOTAL COSTE			141.330

Cuadro 18. Coste proporcional del albaricoquero

Concepto	Cantidad (kg/ha)	Precio (pta/kg)	Coste (pta/ha)
Planta	400(5)	234(6)	93.600
Abono (15-15-15)	2.000	27,41	54.820
16 Tratamientos	300(3)	2,2(4)	10.560
COSTE EXPLOTACION			158.980
Amortización coste explotación (15 años)			10.599
Abono (4-8-12)	1.200	16,03	19.236
Nitrosulfato amónico	400	21,99	8.796
7 Tratamientos	800(3)	2,2(4)	14.000
Mano de obra	421(1)	1.451(2)	76.178
TOTAL COSTE			128.809

Cuadro 19. Coste proporcional de la patata

Concepto	Cantidad (kg/ha)	Precio (pta/kg)	Coste (pta/ha)
Siembra	1.200	37	44.400
Estiércol			20.000
Abonado de fondo (0-14+7)	800	14,32	11.456
Abonado de cobertura (nitrato 20 %)	700	22,15	15.505
Combustible	55(1)	360(2)	19.800
3 Tratamientos			1.500
Mano de obra	343(1)	1.451(2)	62.393
TOTAL COSTE			175.054

Cuadro 20. Coste proporcional del espárrago

Concepto	Cantidad (kg/ha)	Precio (pta/kg)	Coste (pta/ha)
Estiércol			40.000
Abonado de fondo (15-15-15)	1.100	27,41	30.151
Plantación	10.900(7)	16(8)	174.400
Abonado de cobertura (urea)	1.100	32,39	35.629
Combustible	43(1)	360(2)	15.480
2 Tratamientos			2.000
TOTAL COSTES IMPLANTACION			297.660
Parte proporcional costes implan- tados (9 años)			33.073
Abonado de fondo (15-15-15)	3.500	27,41	95.935
Abonado de cobertura (urea)	800	32,39	25.912
Tratamientos			4.800
Mano de obra	1.145(1)	1.451(2)	207.493
TOTAL COSTE			367.213

Cuadro 21. Coste proporcional de la lechuga

Concepto	Cantidad (kg/ha)	Precio (pta/kg)	Coste (pta/ha)
Semillero			1.142
Estiércol			20.000
Abonado de fondo (8-15-15)	500	22,74	11.370
Abonado de cobertura (nitrato 26 %)	600	22,15	13.290
3 Tratamientos			3.000
Combustible	45(1)	360(2)	16.200
Mano de obra	667(1)	1.451(2)	121.159
TOTAL COSTE			186.161

Cuadro 22. Coste proporcional del tomate

Concepto	Cantidad (kg/ha)	Precio (pta/kg)	Coste (pta/ha)
Semillero			5.200
Abonado de fondo (12-12-24)	1.000	26	26.000
Abonado de cobertura (nitrato 26 % y CLK)	400 150	26,15 18,07	8.860 2.710
Tratamientos			7.500
Combustible	45(1)	360(2)	16.200
Mano de obra	795(1)	1.451(2)	144.375
TOTAL COSTE			210.845



Cuadro 23. Coste proporcional de la cebolla

Concepto	Cantidad (kg/ha)	Precio (pta/kg)	Coste (pta/ha)
Semillero	6	3.400	20.400
Abonado de fondo (9-18-27)	750	27,83	20.872
Abonado de cobertura (nitrato 26 %)	500	22,15	11.075
Tratamientos			5.410
Combustible	45(1)	360(2)	16.200
Mano de obra	632(1)	1.451(2)	114.629
TOTAL COSTE			188.586

Cuadro 24. Coste proporcional de la alcachofa

Concepto	Cantidad (kg/ha)	Precio (pta/kg)	Coste (pta/ha)
Estiércol			20.000
Abono implantación (15-15-15 y nitrato 33,5 %)	500	27,41	13.705
	250	26,54	6.635
Siembra	12.000(9)	10(10)	120.000
Tratamientos			4.000
Combustible	59(1)	360(2)	21.240
TOTAL COSTE IMPLANTACION			185.580
Parte proporcional coste implantación (2 años)			92.790
Abonado fondo (15-15-15)	400	27,41	10.964
Abonado cobertura (nitrato 33,5 %)	400	26,54	10.616
Tratamientos			2.000
Combustible	62	360	22.320
Mano de obra	883(1)	1.451(2)	160.335
TOTAL COSTE			299.025
(1) horas/ha	(6) pta/planta		
(2) pta/hora	(7) peines/ha		
(3) litros/ha	(8) pta/peine		
(4) pta/l	(9) zuecas/ha		
(5) plantas/ha	(10) pta/zueca		

Fuente: Cavero y Delgado (1984), S.E.A., UTECO, Anuario de Estadística Agraria y elaboración propia.

A N E J O V
SALINIDAD DE LA ACEQUIA URDAN

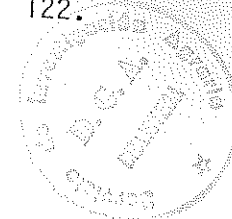
Cuadro 25. Salinidad media mensual de la acequia Urdán (CE, mmho/cm)

Mes	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
Octubre	1,7	2,2	2,7	1,1	1,9	2,5	2,7	3,0	2,8	2,8
Noviembre	1,4	2,2	1,6	1,5	2,7	2,2	2,7	2,9	1,8	2,7
Diciembre	1,4	2,2	1,4	2,0	2,9	2,2	2,3	0,7	0,7	2,5
Enero		1,4	0,4	0,7	0,5	1,9	1,9	2,1	0,7	0,9
Febrero		1,9	2,2	0,6	0,5	0,7	2,1	2,9	0,7	1,5
Marzo		0,7	2,1	0,6	0,7	0,8	2,2	2,6	1,0	1,3
Abril		2,2	2,6	1,9	2,1	1,2	1,6	2,5	1,7	1,9
Mayo		0,5	2,2	2,1	1,5	1,3	2,0	2,6	1,8	2,1
Junio		2,1	1,7	2,1	0,9	0,9	2,1	2,0	2,1	2,1
Julio		1,9	2,5	0,8	2,1	1,7	2,1	2,3	2,1	2,1
Agosto		1,8	2,5	2,1	1,6	2,2	2,5	2,2	2,6	2,2
Septiembre		1,8	2,4	2,0	1,9	2,3	2,7	2,9	2,1	2,4

Fuente: Departamento de Suelos y Riegos. Servicio de Investigación Agraria.-
Diputación de Aragón.

ANEJO VI

CAUDAL MEDIO MENSUAL DEL GALLEGO EN ARDISA

Cuadro 26. Caudal medio mensual del Gállego en Ardisa (m³/seg)

	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
	-75	-76	-77	-78	-79	-80	-81	-82	-83
Octubre	14,96	11,43	3,10	18,48	10,19	9,85	7,81	5,90	9,53
Noviembre	15,03	10,12	12,06	15,31	7,28	9,81	7,92	6,81	38,24
Diciembre	15,67	8,55	31,05	16,50	7,36	9,73	9,89	17,25	49,44
Enero	15,13	8,74	44,91	26,10	19,42	12,35	11,27	26,50	35,87
Febrero	9,36	11,75	48,16	60,36	90,72	7,75	4,06	40,51	23,69
Marzo	23,83	7,82	38,76	52,47	36,66	13,53	9,57	24,53	26,17
Abril	19,85	14,74	16,19	26,20	37,60	16,66	13,31	17,47	15,12
Mayo	28,39	14,08	15,16	29,58	25,66	14,12	12,20	14,88	12,63
Junio	26,04	14,38	31,03	31,50	106,85	14,17	13,68	15,40	13,60
Julio	16,90	13,71	23,34	16,59	18,48	14,51	12,24	13,31	13,95
Agosto	15,56	8,80	15,31	16,24	14,31	11,05	12,00	10,49	10,63
Septiembre	10,47	4,76	18,17	13,17	12,33	9,22	6,23	10,27	8,69
Media	17,6	10,7	24,2	26,7	32,24	11,90	10,02	16,94	21,46

Fuente: Comisaría de Aguas del Ebro. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo

A N E J O VII

MESES DE RIEGO PARA LOS DIFERENTES CULTIVOS



Cuadro 27. Meses de riego para los diferentes cultivos

	Trigo	Cebada	Maíz	Alfalfa	Patata	Huerta	Frutales
Enero							
Febrero	X	X		X			
Marzo	X	X		X	X		
Abril	X	X	X	X	X		
Mayo	X	X		X	X	X	X
Junio			X	X	X	X	X
Julio			X	X	X	X	X
Agosto			X	X	X	X	X
Septiembre			X	X	X	X	X
Octubre	X	X					
Noviembre							
Diciembre							

Fuentes: Javier Cavero. S.I.A., D.G.A. Comunicación personal.

Joaquín Gómez Aparisi. S.I.A., D.G.A. Comunicación personal.

Plan Hidrológico Nacional (siembra y recolección de la patata).

A N E J O VIII

CAUDAL DEL GALLEGO EN ARDISA

Cuadro 28. Caudal del Gállego en Ardisa (m³/seg)

Año hidrológico	m ₃ /seg
1945-46	31,4
1946-47	32,9
1947-48	19,6
1948-49	8,1
1949-50	22,5
1950-51	36,8
1951-52	22,5
1952-53	16,8
1953-54	17,1
1954-55	19,2
1955-56	29,4
1956-57	12,7
1957-58	15,2
1958-59	23,6
1959-60	45,1
1960-61	34,9
1961-62	33,7
1962-63	28,0
1963-64	28,6
1964-65	20,7
1965-66	43,4
1966-67	36,7
1967-68	21,2
1968-69	40,6
1969-70	23,8
1970-71	30,0
1971-72	26,7
1972-73	24,5
1973-74	19,1

Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Dirección General de Obras Públicas. Aforos.



006351