

CAPITULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta la información necesaria, tanto para la calibración como para la simulación del modelo Producción-Salinidad, así como también los resultados de la calibración, simulación, valoración económica de los cultivos por la salinidad del suelo y el efecto social asociado.

La información utilizada para la calibración y simulación del modelo PROSAL fue la siguiente:

- Climática: precipitación y evaporación.
- Suelo: características físico-químicas (CC, PMP, coeficiente hidrodinámico y conductividad eléctrica en el extracto de saturación).
- Agua: Conductividad eléctrica (dS/m) del agua de riego.
- Cultivos: Características agronómicas de los cultivos de papa, cebada, quinua y alfalfa.

Para la evaluación económica se tomó en cuenta la información sobre rendimientos, precios y costos de producción de los cultivos de papa y alfalfa estimados para la zona de estudio. Para evaluar el efecto social de la salinización del suelo y su influencia en los agricultores afectados, se consideró una cesta básica de US\$ 4800 por año, estimada por los agricultores locales en el Taller Comunal.

Información recopilada para la aplicación del modelo y su análisis evolutivo

Precipitación y evaporación utilizados en el modelo PROSAL

La información climática obtenida permitió conocer que el ciclo de los cultivos de papa y quinua se inicia en el mes de octubre y el de las forrajeras, cebada y alfalfa, generalmente se inician en el mes de septiembre. Para el período de registro comprendido entre los años 1974 y 1988, la zona presenta una precipitación media anual de 482,5 mm; donde los meses más secos fueron mayo, junio y julio, con un valor medio de 35,3 mm. Los meses con fuertes concentraciones pluviales fueron enero, febrero y parte de marzo, con un promedio de 203 mm. La evaporación, en la mayoría de los casos es superior a la precipitación; con un total de 1785 mm al año, para el período indicado anteriormente.

Los valores de precipitación y evaporación del período de registros 1974-1988 y las traza de las mismas por el modelo HEESMM se utilizaron en las fase

de calibración y simulación, respectivamente. Los valores históricos se muestran en el Apéndice 3 y los simulados en la Tabla 24 que se presenta más adelante.

La Tabla 11 muestra los datos de la precipitación y evaporación por ciclo de cultivo en mm/mes. Se consideraron los meses de octubre a febrero y de septiembre a febrero para los ciclos de cultivos de papa, cebada, quinua y alfalfa.

Tabla 11. Precipitación y evaporación promedio por ciclo vegetativo de los cultivos papa, cebada, quinua y alfalfa; Estación Climatológica San José Alto, provincia Gualberto Villarroel

MES	PROMEDIO 1974-1988	
	PRECIPITACION (mm)	EVAPORACION (mm)
SEPTIEMBRE	9.45	126.3
OCTUBRE	8.33	153.8
NOVIEMBRE	25.69	144.6
DICIEMBRE	58.47	129.8
ENERO	99.82	108.6
FEBRERO	93.86	98.8

La Figura 4 ilustra que al inicio, durante y al final del ciclo vegetativo, la evaporación fue siempre superior a la precipitación pluvial, evidenciándose que la precipitación es insuficiente para el desarrollo normal de los cultivos.

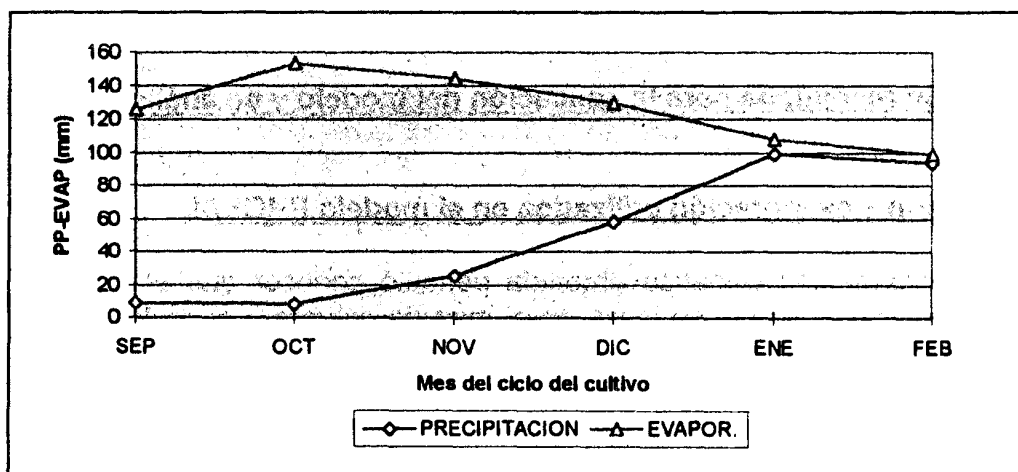


Figura 4. Precipitación y evaporación mensual en mm, Estación climatológica San José Alto, provincia Gualberto Villarroel (período 1974-1988)

El recurso suelo

Los suelos afectados por las sales son aproximadamente el 85% (3500 ha) respecto de la superficie total del cantón de Unupata (4118 ha), provincia Gualberto Villarroel. Las características físicas y químicas se describen a continuación.

Características físicas de los suelos utilizadas en el modelo PROSAL

La Tabla 12 muestra las características de los suelos utilizados en el proceso de calibración y simulación con el modelo PROSAL: capacidad de campo y punto de marchitez permanente; densidad aparente y coeficiente hidrodinámico obtenidos con base en la textura del suelo, este último tomado de acuerdo a Norero (1976) (Apéndice 5). Las características señaladas corresponden a la capa arable de 23 cm, éstas se tomaron como base para el proceso de calibración del modelo y simulación de la evolución salina en suelos y su efecto en el rendimiento de los cultivos.

Tabla 12. Características físicas y humedad de los suelos (capa arable) de Unupata Centro

Sector	Clase textural	C.C. (%)	P.M.P. (%)	D. a. (Mg/m ³)	Coeficiente Hidrodinámico
Unupata Centro	L A - A	21	8,2	1,3	0,45

Fuente: Elaboración propia con base en SNAG (1972) y Ledezma (1995).

Características químicas del suelo utilizada por el modelo PROSAL

La conductividad eléctrica en el extracto de saturación de los suelos se muestra en la Tabla 13. Para efectos de calibración y simulación del modelo Producción-Salinidad se usaron los correspondientes datos de la capa arable, de un espesor de 23 cm. La conductividad eléctrica media de 1,56 dS/m se uso para el proceso de calibración del modelo; mientras que el valor de 4,77 dS/m se utilizó en la simulación de la salinidad del suelo y del rendimiento de los cultivos seleccionados.

Tabla 13. Características de la salinidad promedio a diferentes profundidades de los suelos salinos de Unupata Centro

Conductividad eléctrica en extracto de saturación - suelos salinos en dS/m			
PROFUNDIDAD (cm)	1974	PROFUNDIDAD (cm)	1988
00 - 23	1,56 *	00 - 24	4,77 [#]
23 - 38	1,92*	24 - 37	9,37 [#]
37 - 48	4,94*	37 - 50	8,02 [#]

Fuente: Elaboración propia con base en (*) Quisbert, 1980 y (#) Ledezma, 1995.

El recurso agua

Calidad del agua de riego.

Los resultados presentados se basaron en informaciones citadas por SNAG (1978), Sejas (1993) y Ledezma (1995). La escasez de información en cuanto a la salinidad del agua de riego limita sobremanera el determinar la evolución de sales en años consecutivos.

La calidad de agua del río Desaguadero a nivel de la toma de Unupata Centro fue clasificada, de acuerdo a los criterios del USDA (1954), como mixta sódica, de tipo C3 - S2, agua altamente salina y de contenido medio de sodio. Para el proceso de calibración se tomó el valor promedio de 1,44 dS/m y 1,52 dS/m para la fase de la simulación.

Características y rendimiento de los cultivos

La Tabla 14, muestra las características agronómicas de los cultivos considerados en los procesos de calibración del modelo, simulación de la salinidad de suelos y el efecto que éste último tiene en el rendimiento de los mismos.

Tabla 14. Parámetros de los cultivos evaluados en el sector de Unupata Centro

Cultivos evaluado	Coefficiente de desarrollo foliar (a)	Coefficiente de densidad de enraizamiento (r)	Profundidad radicular típica (cm)	Salinidad umbral (S.u.)	Pérdida de rendimiento por aumento unitario % (b)	Periodo vegetativo (meses)
papa	4,8	0,35	30	1,7	12	5
cebada	3,6	0,60	25	6,0	7,1	4
quinua	4,7	0,30	30	5,1	10,1	5
alfalfa	6,0	0,41	100	3,5	7,2	6

Fuente: Adaptado de Norero (1987).

Nota. Los parámetros (a) y (r) son obtenidos de las Tablas 2 y 3 de Norero, 1976; y los parámetros (Su) y (b) fueron obtenidos de la Tabla 4 FAO (1987). Apéndice 5.

La Tabla 15 señala los rendimientos históricos de los cultivos papa, cebada, quinua y alfalfa en los suelos salinos bajo riego durante el período de 1974 a 1988.

Los rendimientos, precios y costos de producción históricos se incluyen en las Tablas 15, 16 y 17 para el período agrícola 1995/1996. Los rendimientos se usaron para determinar la evolución de los cultivos en condiciones de salinidad en los suelos. Los valores y costos de producción fueron utilizados para la estimación de los beneficios netos de los cultivos de papa y alfalfa, que se obtuvieron mediante la simulación.

Tabla 15. Rendimientos históricos de los cultivos andinos (Mg/ha) en suelos ensalitrados bajo condiciones de riego (período 1974 - 1988)

CULTIVOS ANDINOS CON RIEGO (Mg / ha)				
AÑO	PAPA	CEBADA	QUINUA	ALFALFA
1974	5.20	1.98	1.16	6.41
1975	4.95	1.85	1.35	
1976	5.25	2.00	1.00	
1977	4.90	2.40	1.40	
1978	5.20	2.00	1.07	6.12
1979	5.10	1.95	1.13	
1980	5.10	1.96	0.86	
1981	4.90	2.10	0.90	6.04
1982	5.00	2.09	0.55	
1983	5.20	2.59	0.64	
1984	5.01	2.52	0.63	6.08
1985	4.64	2.16	0.58	
1986	4.82	2.47	0.60	5.75
1987	4.84	2.54	0.57	
1988	3.86	2.74	0.48	5.71

Fuentes: Elaboración propia con base en SNAG (1993) y YUNTA (1996).

El rendimiento de los cultivos papa, quinua y alfalfa, bajo las condiciones de salinidad, fue ligeramente afectado, mientras que el rendimiento de la cebada parece no haber sido afectado por la salinización de los suelos. Estos rendimientos históricos también pudieron ser afectados por otros factores ambientales, como la helada, granizo, sequía, inundaciones y agua salada, Figura 5.

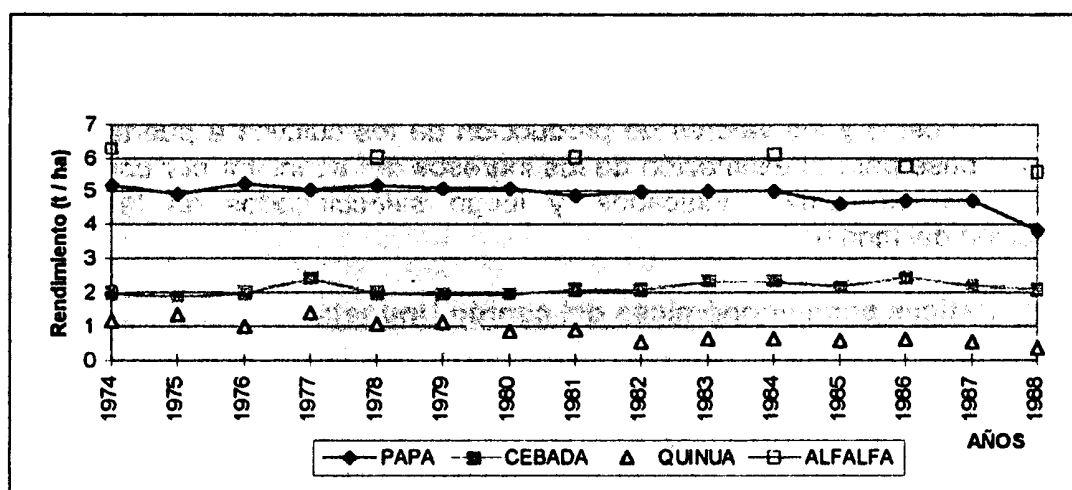


Figura 5. Evolución histórica de rendimiento en suelos salinos, bajo condiciones de riego, período 1974 - 1988.

El rendimiento en los suelos salinos, así obtenidos, no fue influenciado por la fertilización inorgánica, pues, generalmente se procede a sembrar los cultivos con abonos orgánicos, como el estiércol de ovino y vacuno, y en muy contadas ocasiones se recurre al uso de abonos inorgánicos nitrogenados, Figura 5.

Tabla 16. Determinación promedio de precios a puerta de finca (1995-1996)

PRECIOS A PUERTA DE FINCA				
PERIODO 1995-1996 (US\$)				
ITEM	PAPA @	CEBADA QQ	QUINUA QQ	ALFALFAQQ
Promedio	3,30	10,00	28,17	10,50
PRECIOS EN US\$ POR Mg				
	264	200	563,4	210

Fuente: Elaboración propia con base en SNAG e INE (1996).

La Tabla 17 incluye los costos de las cosechas durante el período 95/96 en dólares americanos, costos éstos que fueron el elemento base para la estimación de los beneficios netos de los rendimientos obtenidos en el proceso de simulación del rendimiento para un período de veinte años, a partir del año 1988.

Tabla 17. Costos de producción de los cultivos agrícolas

COSTOS DE PRODUCCION DE CULTIVOS EN SUELOS SALINOS CON RIEGO				
PERIODO 1995 - 1996 (US\$/ha)				
ITEM	PAPA	CEBADA	QUINUA	ALFALFA
PROMEDIO	930	270	290	300

Fuente: SNAG (1996).

Los costos y los valores de producción de los cultivos a puerta de finca fueron la base para la estimación de los ingresos del agricultor por concepto de siembra de los cultivos indicados, y luego seleccionados en la fase de calibración del modelo.

Características socioeconómicas del cantón Unupata

La evolución de la salinidad de los suelos, en el área de estudio aumentó de 1,56 dS/m a 4,77 dS/m bajo riego, para un período de quince años, provocando bajos rendimientos en la actividad agrícola, tal como se señaló en la Tabla 15. De esta manera el proceso de salinización de los suelos se puede decir que es uno de los elementos que contribuye a la alteración de los aspectos socioculturales y de las actividades técnico-económicas (uso de la tierra, actividades productivas e ingreso del agricultor), ocasionando finalmente el bajo nivel de vida del agricultor en el Cantón de Unupata; esto contribuye a la migración a ciudades de mayor actividad económica.

Aspectos de la actividad técnico - económica

Estructura y producción agrícola. La tenencia de la tierra y propiedad familiar son descritas en el Capítulo 3. Los resultados obtenidos a través del taller comunal, se presentan a continuación.

Uso de la tierra. De acuerdo con los datos obtenidos, se puede decir que el 44% de las tierras del Cantón Unupata son aptas para la agricultura, el 29,4% son adecuadas para el pastoreo y el 18% son suelos no aptos para la agricultura. Similar proporción se presenta en Unupata Centro.

Los datos de la distribución de tierras por su capacidad de uso agrícola, con y sin riego y otros usos, se basaron en una superficie de 29 ha por familia, Tabla 18.

Tabla 18. Distribución de tierras para uso familiar del Cantón Unupata (ha)

CAPACIDAD DE USO	SUPERFICIE (ha)	PORCENTAJE (%)
Cultivada con riego	0,50	1,72
Cultivada sin riego	5,00	17,24
En descanso	5,80	20,00
Pastoreo	11,00	37,93
No cultivable	6,70	23,11
Total	29	100

Fuente: Elaboración propia con base en Taller comunal, 1996

En relación a la posesión de la tierra, la Tabla 7 del Capítulo 3, muestra que la posesión de la tierra es mayor a 19 ha por familia en un 30,8% y el resto posee superficies menores a 17,99 ha por familia.

Características de la producción agrícola. En la práctica, la producción agrícola es de autoconsumo, con algunas excepciones para los cultivos como papa, cebada (grano), quinua, chuño y tunta (derivados de la papa) que son para fines de comercio. Los cultivos como el haba, oca y papaliza se consideran no comerciables, pues generalmente son para el consumo familiar.

El rendimiento promedio de la papa (*Solanum tuberosum*) en el período comprendido entre 1974 a 1988 fue de 4,93 Mg/ha. Este cultivo se viene practicando desde la época del Inca. Tradicionalmente el altiplano boliviano se caracteriza por la producción de papa que es fuente importante de alimentación del pueblo.

El cultivo andino quinua (*Chenopodium quinoa*) es característico del Altiplano boliviano. Es notorio que este cereal en los últimos años viene decreciendo en su producción; el rendimiento promedio entre los años 1974 a 1988 fue de 0,88 Mg/ha. Su consumo ha sido reemplazado por otro cereal no nativo de la zona, como el arroz y el trigo. Apéndice 6.

El cultivo de cebada (*Hordeum vulgare*) se siembra para aprovechar el grano (comerciable), con rendimiento de 2,22 Mg/ha (1974-1988). Su tallo se utiliza para fines de forraje como alimento suplementario en la actividad pecuaria.

La siembra del cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*) tiene como objeto mejorar la composición nutritiva del ganado; el rendimiento obtenido entre 1974-1988 fue de 6,17 Mg/ha, según SNAG (1993). Apéndice 6.

Evolución de la salinización en suelos y aguas

Análisis evolutivo de la salinidad de los suelos de Unupata Centro

Los suelos salinos de Unupata Centro inicialmente son el resultado del proceso de su formación geológica, que luego de la aplicación de riego con aguas salinas desde el año 1963, fue incrementándose cuantitativamente, según SNAG (1971). El informe, además, menciona que la presión ejercida por la placa de Nazca, llevó consigo grandes cantidades de aguas marinas que con el tiempo fueron aflorando en la superficie del suelo por efectos climáticos. El cantón Unupata y por ende Unupata Centro es uno de los más afectados por la salinidad y degradación ambiental. Estos suelos corresponden a la zona semiárida, y son el resultado de la situación orográfica, efectos climáticos y la acción antrópica entre otros. Los principales factores que inciden en la formación de este tipo de suelos de Unupata son el clima, el material parental, la napa freática, el drenaje interno y principalmente el riego con aguas de mala calidad.

Evolución de la salinidad en el recurso suelo

Para determinar la evolución de la salinidad de los suelos de Unupata Centro, se empleó la información citada por SNAG, 1971, Quisbert, 1980, Sejas, 1993 y Ledezma, 1995. Como se puede apreciar en la Tabla 19, la concentración salina varía de 1,56 dS/m a 4,77 dS/m. para los años 1974 - 1988, respectivamente. Estos análisis fueron realizados en el extracto de saturación. Los datos así obtenidos corresponden a diferentes lugares del área de estudio, por lo tanto, para propósitos de estudio se considera el promedio de los mismos. Esta evolución se muestra en la Figura 6 y en Apéndice 6.

Tabla 19. Conductividad eléctrica medida en campo, período 1974-1988

EVOLUCION DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA - SUELOS SALINOS																
PERIODO 1974 - 1988 (dS/m)																
Año	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	
C.Ee	1.56	1.86	1.99	2.40	2.80	3.10	3.79	3.51	3.69		4.02		3.96		4.77	

Fuente: Elaboración propia con base en SNAG, 1993, Sejas, 1993 y Ledezma, 1995.

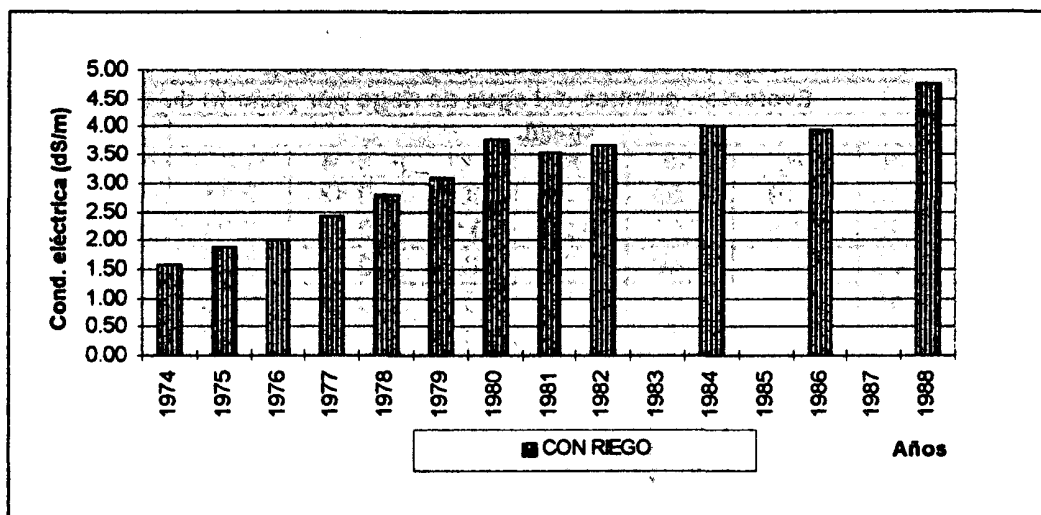


Figura 6. Evolución de la salinidad en los suelos de Unupata Centro, provincia Gualberto Villarroel, período 1974-1988

En la Figura 6 se muestra que la salinidad de los suelos tuvo una evolución creciente de 1,56 dS/m para el año 1974 llegando a 3,81 dS/m en el año 1980. Posteriormente, la salinidad disminuye en el año 1981 debido a la precipitación que fue mayor al año 1980; para luego volver a aumentar hasta el año 1984. El año 1986 disminuye ligeramente la salinidad en los suelos, pero en el año 1988 el ascenso fue brusco, pues llegó a 4,77 dS/m.

En consecuencia, la salinización de los suelos tiene estrecha relación con la precipitación, no sólo por el aporte directo sino también por el aumento del caudal del río Desaguadero y su posterior disposición para el riego.

Evolución de la salinidad en el recurso agua de riego

La evolución de la salinidad en el agua de riego se estudio desde 1974 hasta 1988, en 6 años discontinuos. La calidad del agua de riego del río Desaguadero a nivel de la toma de Unupata Centro fue caracterizado según el USDA (1954) de clase mixta, de tipo C3-S2 (donde C3 : 0,751 - 2,250 dS/m y RAS mayor a 5 USDA, 1954).

La Tabla 20 y la Figura 7 muestran los resultados obtenidos por SNAG (1972), Quisbert (1980) y Ledezma (1995). Las lecturas fueron tomadas a mediados del ciclo vegetativo. Las muestras para la evaluación de la calidad de agua para el riego se obtuvieron de la toma de Unupata Centro a mediados del ciclo vegetativo.

Tabla 20. Análisis químico del agua de riego realizado a mediados del ciclo vegetativo de los cultivos (1974-1988)

AÑOS	Evolución químico del agua de riego por periodo de 6 años							
	cmol/L							C.E.
	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃	dS/ m
1974	4,12	1.19	7,53	0.25	10.0	0.43	2.11	1.44
1976	4,23	0.98	7,57	0.29	9.98	0.46	2.34	1.38
1979	4,08	0.97	7,49	0.38	10.34	0.49	2.52	1.49
1982	4,18	0.96	7,50	0.38	10.88	0.54	2.43	1.51
1985	4,21	0.94	7,48	0.41	10.99	0.59	2.36	1.50
1988	4,26	0.9	7,50	0.40	11.40	0.60	2.40	1.52

Fuente: Elaboración propia con base en SNAG, Quisbert y Ledezma (1972, 1980 y 1995).

Por otro lado Sejas (1993) confirmó que estas aguas son de alta salinidad y de contenido medio de sodio, es decir C3-S2.

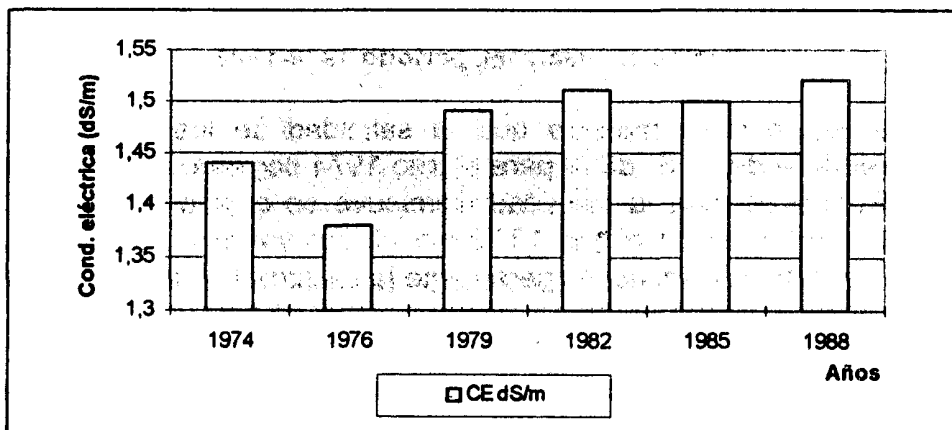


Figura 7. Evolución de la calidad del agua para riego, período de 6 años discontinuos, Unupata Centro (1974-1988)

En la Tabla 20 se observa un incremento en la concentración de los cationes y aniones. La conductividad eléctrica del agua de la toma de Unupata Centro entre 1974 y 1988 señala un aumento de 0,08 dS/m, es decir, de 1,44 dS/m a 1,52 dS/m. todas las muestra fueron tomadas a mediados del ciclo vegetativo y en diferentes sitios de la toma de Unupata Centro. No obstante, por el sitio de muestreo, la diferencia en salinidad del agua no es significativa.

En la Figura 7 se puede apreciar la variación de la salinidad del agua utilizada para riego en Unupata Centro. Se observa que del año 1974 al año 1976 la concentración de sales disminuye, y es a partir de éste último año que asciende, primero violentamente en 1979, para luego aumentar hasta el año 1982, luego disminuye la concentración de sales en el año 1985 y vuelve a incrementarse en el año 1988 año en el cual la conductividad eléctrica del agua de riego es de 1,52 dS/m. El incrementó de la conductividad eléctrica del año

1988 puede ser debido a la escasa precipitación pluvial del mismo, según SENAMHI (1995).

Aplicación del modelo PROSAL

Calibración del modelo PROSAL

El proceso de calibración del modelo PROSAL se realizó por comparación visual. Se buscó que los datos de conductividad eléctrica generados por el modelo representaran a los medidos "*in situ*", determinados en el extracto de saturación. Para tal propósito se siguieron los siguientes pasos:

Datos de entrada

Las características físico-químicas de los suelos se muestran en las Tablas 12 y 13, la calidad de agua de 1,44 dS/m y las características agronómicas de los cultivos utilizados en el proceso de calibración se presentan en la Tabla 14.

El modelo PROSAL, para fines de la calibración del parámetro conductividad eléctrica (C.E.e) del suelo medida "*in situ*", divide en tres sectores la entrada de datos, ellos son: características del sector, características agronómicas de los cultivos y valores de la salinidad suelo-agua-planta.

Debido a que los pasos a seguir en la entrada de datos son similares para los cuatro cultivos: alfalfa, cebada, papa y quinua, respectivamente, se presenta a continuación, cómo ejemplo, el correspondiente al cultivo de alfalfa.

Características del sector

Número de años a estudiar	15
Número de sectores de riego a procesar	1,0
Nombre del sector de riego	Unupata Centro
Densidad aparente del sector (Mg/m ³)	1,30
Humedad a capacidad de campo -gravimétrico (%)	21
Humedad a punto de marchitez permanente - gravimétrico (%)	8,2
Coefficiente hidrodinámico	0,45
Eficiencia de riego global para el sector	0,50
Número de cultivos considerados en el sector de riego	1,0

Datos característicos del cultivo

Nombre del cultivo	alfalfa *
Coefficiente de desarrollo foliar del cultivo (Tabla 3 del Apéndice 5)	6,0 *

Coeficiente de densidad de enraizamiento (Tabla 2 del Apéndice 5)	0,41 *
Profundidad radical típica (cm)	100 *
Periodo vegetativo del cultivo (meses)	6,0 *
Código para salida de demanda del cultivo	1,0
Código para leer los datos de precipitación	1,0
Código para leer los datos de evaporación en mm	1,0
Código para especificar la duración del cultivo	0,0

Valores para salinidad

Porcentaje de humedad del suelo a saturación en volumen (%)	0,50
Conductividad eléctrica del agua de riego (dS/m)	1,44
Conductividad eléctrica inicial en extracto de saturación (dS/m)	1,56
Eficiencia del lavado (%)	&
Factor para afectar la lámina de riego que se infiltra realmente	&
Pérdida de rendimiento por aumento unitario de salinidad (b) (%/dS/m)	7,2 *
Salinidad umbral para el cultivo (Su) (dS/m)	3,5 *
Número de hectáreas a regar para el año 1	1,0
% del área a sembrar para el sector 1	100
Mes de siembra para este cultivo en el sector 1	10 *

Nota:

* : Varía según el tipo de cultivo (papa, quinua, cebada y alfalfa)

& : Variables de calibración a obtener por tanteo.

Introducidos los datos iterativamente en el modelo PROSAL y su correspondiente activación del mismo, se obtuvo los siguientes resultados: conductividad eléctrica en dS/m, precipitación efectiva en mm, evapotranspiración máxima en mm, etc. Los datos de conductividad eléctrica final generados y las medidas "*in situ*", son considerados importantes para el estudio de caso, ellos se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Datos de la conductividad eléctrica (dS/m) medidos y simulados en el extracto de saturación del suelo, para la eficiencia de lavado de 0,47 y lámina que realmente se infiltra con base en datos históricos (1974-1988), Unupata.

EVOLUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA EN SUELOS SALINOS (dS/m)					
Año	MEDIDOS	GENERADO POR MODELO (lámina que realmente se infiltra)			
		papa 1.56	cebada 1.54	quinua 1.55	alfalfa 1.58
1974	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56
1975	1.86	2.51	3.38	2.55	2.28
1976	1.99	2.92	3.47	3.27	3.16
1977	2.40	3.04	4.11	3.86	2.84
1978	2.8	3.40	4.19	3.92	3.26
1979	3.10	3.36	4.09	4.06	3.44
1980	3.79	3.81	4.14	4.02	3.88
1981	3.53	3.78	3.86	4.01	3.87
1982	3.69	4.01	4.11	4.15	3.99
1983		3.75	3.33	3.83	3.68
1984	4.02	4.02	3.82	4.00	3.85
1985		4.13	4.00	4.12	3.96
1986	3.96	4.17	3.01	4.00	3.95
1987		2.86	2.19	3.68	3.54
1988	5.77	3.89	3.51	3.95	3.80

Los análisis que a continuación se muestran son hechos con base en la Tabla 21 y las Figuras 8, 9, 10 y 11. Se consideraron los cultivos papa, cebada, quinua y alfalfa, para efectos de la calibración del modelo.

- Los resultados de la eficiencia de lavado y de la lámina de riego que realmente se infiltra, y los datos de la Tabla 21 que muestran la conductividad eléctrica final de los suelos medidos y los simulados, corresponden a los cultivos de papa, cebada, quinua y alfalfa. Estos resultados son representados en las Figuras 8, 9, 10 y 11 para apreciar la mejor representación de la salinidad generada por el modelo con la medida en el campo. Estos datos se muestran a continuación.

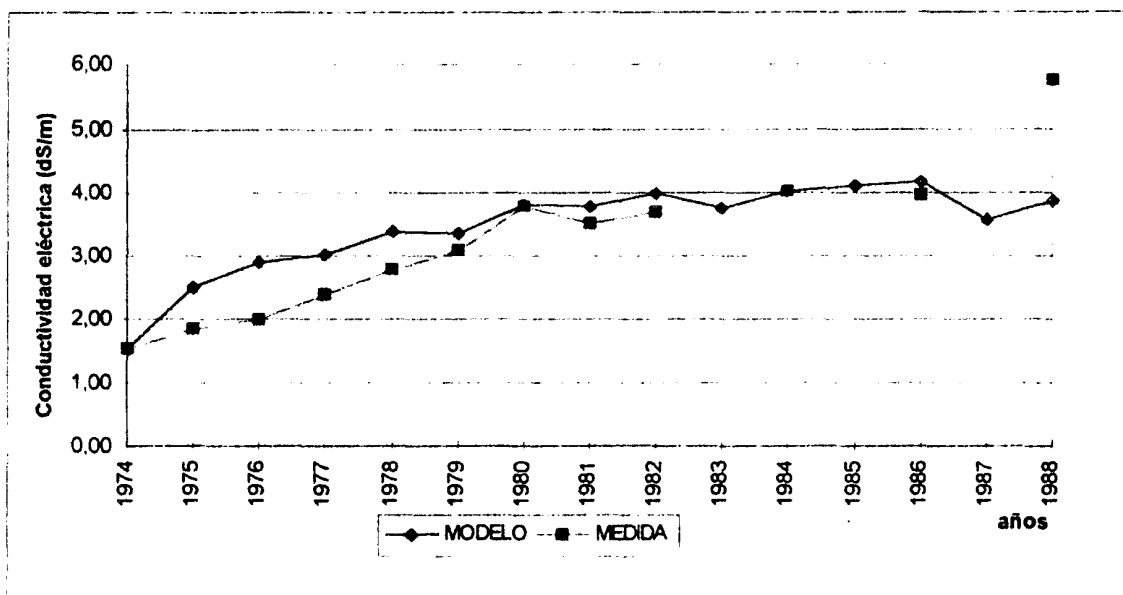


Figura 8. Comparación de la conductividad eléctrica dS/m medida con la simulada para el cultivo de papa, período 1974-1988 (Unupata Centro)

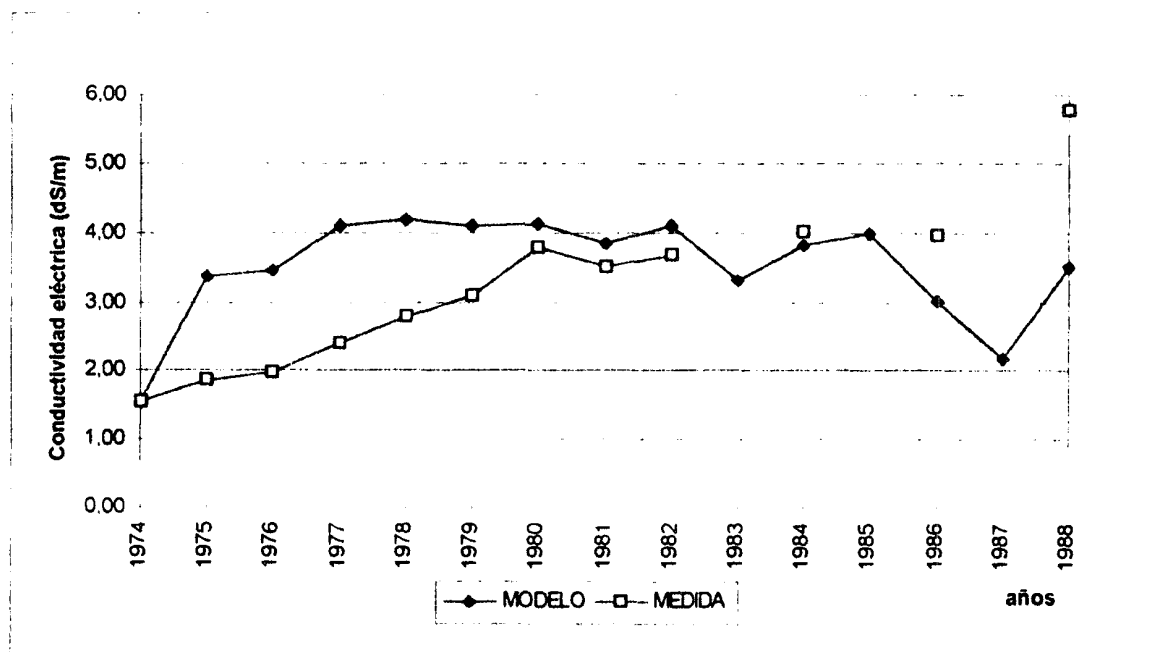


Figura 9. Comparación de la conductividad eléctrica dS/m observada con la simulada para el cultivo de cebada, período 1974-1988

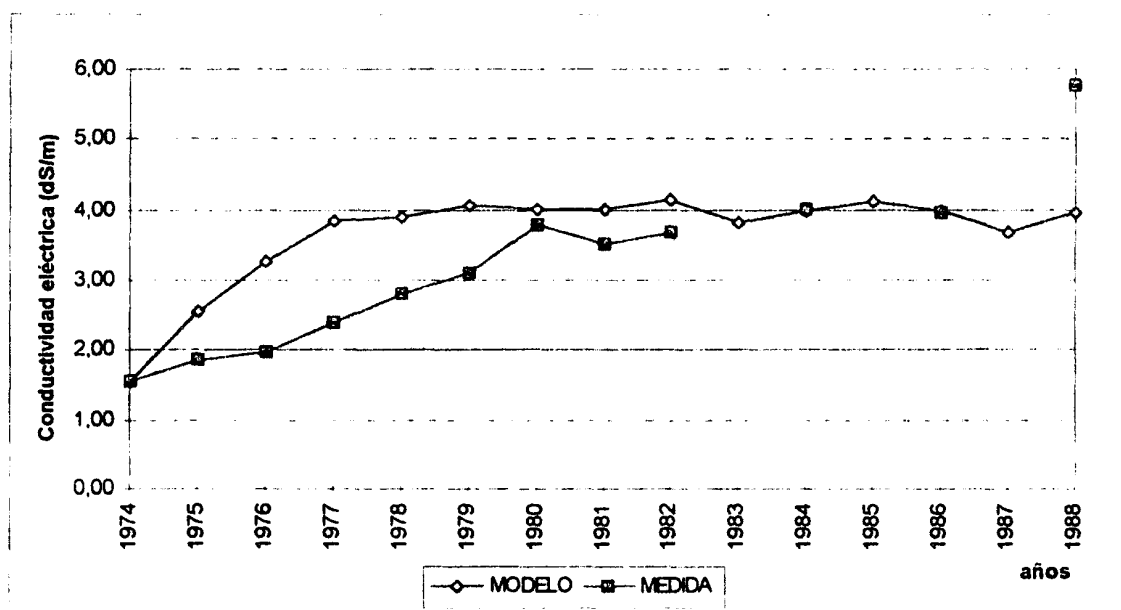


Figura 10. Comparación de la conductividad eléctrica dS/m, observada con la simulada para el cultivo de quinua, periodo 1974-1988

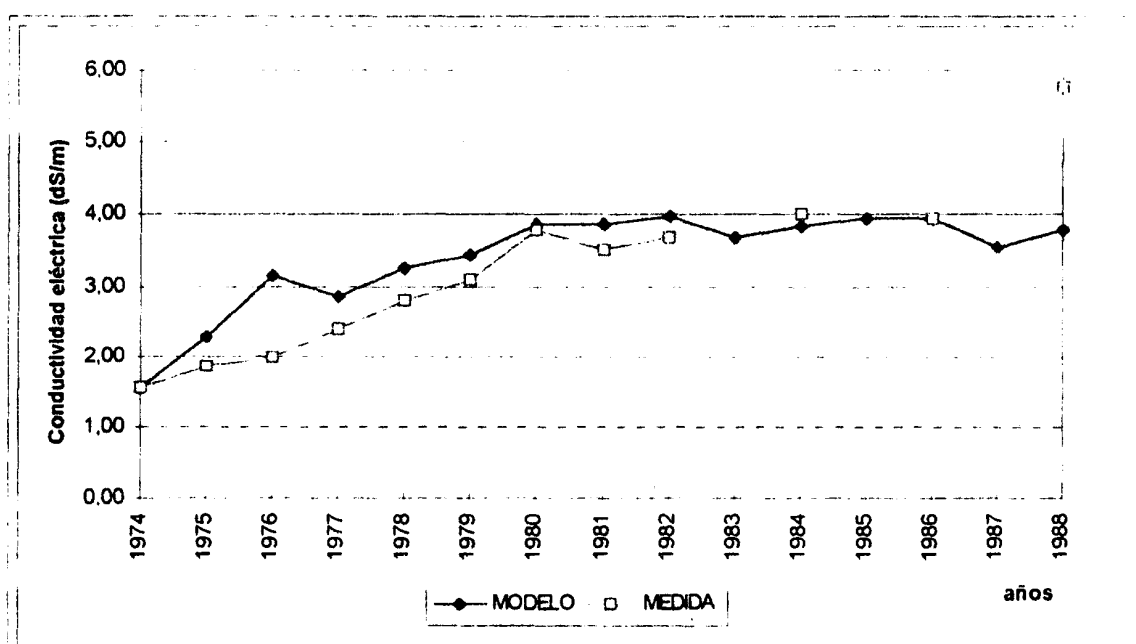


Figura 11. Comparación de la conductividad eléctrica dS/m observada con la simulada para el cultivo de alfalfa, periodo 1974-1988

- En las cuatro figuras mostradas, la conductividad eléctrica simulada que más contrasta con la medida "*in situ*" sirvió de base para la obtención de valores de eficiencia de lavado y lámina de riego que realmente se infiltra. Estos valores fueron hechos al tanteo y permitieron calibrar el modelo con los siguientes resultados de eficiencia de lavado:

- 0,46 para los cultivos de cebada y quinua,
- 0,47 para el cultivo de papa y alfalfa

Los valores obtenidos de eficiencia de lavado para suelos arcillosos a arcillo limosos, son corroborados por FAO (1993), UNESCO (1970) y Pla y Dappo (1975). Al respecto la FAO señala que la textura del suelo es uno de los factores que limita el movimiento del agua de acuerdo a su composición textural. Por ejemplo, la eficiencia de lavado para suelos de textura arcillosa a limo arcillosos varía de 0,30 a 0,50, es decir, que el agua pase a través de la zona radical con la respectiva remoción de sales.

Las expresiones de UNESCO (1970), corroboradas por Pla y Dappo (1975) señalan que la eficiencia de lavado es la fracción de agua que pasa a través de la zona radical, que realmente lava las sales y cuyo valor depende de la textura, estructura y del método de riego. Por ejemplo suelos de textura arcillosa que forman grietas tienen valores menores a 0,30, mientras que en los suelos bien estructurados de textura franca mayores a 0,60 .

- Los valores del factor de lámina de riego que realmente se infiltra, y que permitieron una mejor comparación con la conductividad eléctrica del suelo "*in situ*" fueron los siguientes:

- Cultivo de papa : 1,56
- Cultivo de cebada : 1,54
- Cultivo de quinua : 1,55
- Cultivo de alfalfa : 1,58.

- Los factores de lámina de riego para el lavado de sales obtenidos por el modelo PROSAL en 1,56; 1,54 ; 1,55 y 1,58 significan que debe suministrarse un exceso de lámina de riego de 56%, 54%, 55% y 58%, respectivamente. En la Tabla 22 se resumen los valores obtenidos de eficiencia de lavado y lámina de riego que realmente se infiltra resultante del proceso de calibración del modelo.

Tabla 22. Valores de eficiencia de lavado y lámina de riego que realmente se infiltra los cuales permitieron calibrar el parámetro de conductividad eléctrica final medida "in situ" (C. E. f).

Cultivos	Variables de calibración utilizadas, (parámetro a calibrar C.E.f)	
	Eficiencia de lavado	Lámina de riego que realmente se infiltra
Papa	0,47	1,56
Cebada	0,46	1,54
Quinua	0,46	1,55
Alfalfa	0,47	1,58

- La comparación de las curvas de salinidad simuladas con la observadas fueron hechas por observación visual por medio de las Figuras 8, 9, 10 y 11; es decir, que las curvas de salinidad generadas por el modelo que mejor represente al observado "in situ" fueron consideradas la base para la calibración y la correspondiente selección de los cultivos. Estos cultivos seleccionados resultaron ser la papa y alfalfa, (Tabla 23).

Tabla 23. Cultivos seleccionados con base en la calibración del Modelo Prosal

Cultivos	Variables de calibración utilizadas, (parámetro a calibrar C.E.f)	
	Eficiencia de lavado	Lámina de riego que realmente se infiltra
Papa	0,47	1,56
Alfalfa	0,47	1,58

Al contrastar las curvas de conductividad eléctrica observadas "in situ" con la simulada por el modelo, se evidencia la validez del mismo.

- Se hacen, no obstante, algunas consideraciones adicionales relativas a la validez del programa:
 - La conductividad eléctrica generada por el modelo disminuía, al tener una mayor aplicación del agua de riego que realmente se infiltra, es decir correlacionaba mejor a una menor eficiencia de lavado.
 - Las concentraciones salinas generadas por el modelo que tenían menor aplicación del agua de riego, correlacionaban mejor a una mayor eficiencia de lavado.
 - Este comportamiento puede ser de consideración si se toma en cuenta a Beltrán (1986), quién señala que el coeficiente de lavado o eficiencia de lavado es la proporción del agua infiltrada que realmente lixivia las sales y cuyo valor depende de la textura y estructura del suelo y del método de riego. Suelos con textura arcillosa que se agrietan tienen valores más bajos que suelos bien estructurados de textura franca". Al mismo tiempo *"cuanto mayor es la cantidad de agua aplicada menor es*

el coeficiente de lavado, por lo que la eficiencia de lavado de la lluvia y del riego por aspersión es mayor que la del riego por gravedad", tal como lo expresa FAO (1993), citado por Pérez (1995).

Simulación de la evolución de la salinidad de los suelos y rendimiento de los cultivos

Con la simulación se pretende determinar la evolución de la salinidad de los suelos y su efecto en el rendimiento de la papa y alfalfa, para un período de veinte años, iniciado en el año 1988. Los datos utilizados son los siguientes: agronómicos de los dos cultivos seleccionados en la calibración; la salinidad del suelo es de 4,77 dS/m y la salinidad del agua de riego de 1,52 dS/m, valores que se supuso constante durante el proceso, ambos de acuerdo al registro histórico de SENAMHI (1994)

Las variables de eficiencia de lavado es de 0,47, y la lámina de riego que realmente se infiltra es de 1,56 y 1,58 para la papa y alfalfa, respectivamente; es decir, 56 % y 58% de lámina en exceso para el lavado de sales, ambos valores obtenidos en la fase de la calibración. Además, se consideró una lámina de riego que realmente se infiltra de 20% considerando la insuficiencia de agua en la zona de estudio.

Antes de la simulación, se procedió a generar trazas de precipitación y evaporación con base en el modelo HEESMM (Henao, 1987) para un período de 20 años.

La base de datos históricos utilizada para la generación de trazas de precipitación y evaporación fue obtenida en la Estación climatológica de San José Alto para el período 1974-1988. Los datos de salida fueron tres trazas, seleccionándose una con base en análisis estadístico, es decir, aquella que produjo la menor media y desviación estándar, (ecuaciones 4.17 y 4.19). El resultado de la generación de la traza (precipitación y evaporación) se señala en la Tabla 24.

Los intervalos de confianza de la media y desviación estándar para la selección de la traza se basaron en el modelo ANALHEES (Análisis Estadístico Henao, 1987), producto de la entrada de datos como: número de trazas generadas, número de años proyectados, t de Student, Chi cuadrada ($N-1$, $\alpha/2$), Chi cuadrada ($N-1$, $1-\alpha/2$) y Z (cuantil normal para $1-\alpha / 2$), todos generados por el modelo HEESMM (Henao Estadístico Modelo Mensual, 1987).

Tabla 24. Trazas generadas con base en datos históricos (San José Alto)
Datos mensuales y anuales de precipitación (mm)

AÑO	ENER	FEBR	MARZ	ABR	MAY	JUN	JUL	AGOS	SEPT	OCT	NOV	DIC
1	135.54	130.02	89.83	19.20	0.00	0.00	6.08	35.05	1.32	12.65	17.56	61.14
2	48.50	142.33	61.04	22.97	8.14	0.00	0.00	9.96	15.01	28.28	21.87	51.33
3	65.00	16.62	106.88	32.67	1.67	4.25	0.00	16.62	13.07	0.00	23.32	56.47
4	27.73	164.58	112.33	20.47	5.16	0.00	4.27	15.16	11.48	0.00	0.99	27.23
5	165.80	71.23	43.22	3.92	5.21	0.00	0.64	0.00	5.97	7.22	35.61	79.69
6	78.38	27.98	23.04	34.28	0.45	4.00	0.00	29.22	16.77	5.22	51.03	69.24
7	47.24	42.03	61.20	37.17	4.99	0.00	0.00	40.23	17.05	5.80	24.94	56.82
8	56.40	36.18	25.39	21.31	6.98	4.91	4.23	0.00	0.00	3.07	53.69	44.41
9	147.00	104.40	11.30	38.70	3.49	2.98	0.00	15.43	10.30	3.47	3.90	28.00
10	112.06	68.61	72.58	16.05	11.94	0.88	9.98	9.54	13.14	5.75	46.08	88.21
11	113.44	60.00	28.67	16.20	1.87	2.53	3.17	1.43	10.62	21.88	3.51	80.80
12	115.13	121.82	49.55	45.66	1.43	2.21	0.00	0.00	0.00	15.38	16.49	55.49
13	133.39	160.03	27.45	45.05	6.04	0.72	0.00	2.05	5.44	0.00	0.15	36.58
14	75.34	72.49	0.00	1.14	5.33	3.51	11.48	21.98	20.41	17.43	0.00	61.32
15	134.14	160.51	75.95	22.44	3.71	2.17	0.01	21.73	20.62	0.00	0.00	82.80
16	98.73	190.95	53.14	4.03	3.03	0.92	7.37	24.08	20.40	0.00	18.68	51.64
17	83.09	96.24	113.88	47.34	0.00	0.00	0.00	1.47	4.57	0.00	41.59	52.55
18	71.83	94.23	0.00	0.91	1.92	0.00	6.71	0.00	3.05	0.00	51.99	97.19
19	107.10	221.78	113.55	81.86	0.00	2.84	0.00	25.70	39.25	17.89	23.91	65.89
20	189.61	286.80	122.47	30.89	0.80	0.00	0.00	31.64	22.64	0.00	19.70	93.45

Datos mensuales y anuales de evaporación (mm)

1	105.1	80.9	92.3	86.2	76.3	49.6	84.4	181.2	157.4	203.9	179.8	239.1
2	156.3	159.2	99.0	118.5	80.1	67.9	133.0	110.4	135.6	236.6	180.8	163.3
3	157.1	151.2	159.5	147.4	158.4	128.3	119.6	136.0	127.9	104.2	90.5	62.3
4	74.5	44.1	76.3	79.5	60.6	65.2	65.1	134.0	156.8	116.3	93.6	131.9
5	97.0	74.6	113.1	131.8	142.1	136.5	120.3	139.5	100.2	79.8	91.9	109.6
6	92.7	112.9	139.2	177.2	155.9	119.0	97.9	104.3	146.5	164.2	145.7	118.3
7	88.2	106.3	121.8	97.8	81.1	65.2	39.9	122.2	129.2	178.7	136.7	81.5
8	60.2	101.7	109.9	113.5	134.0	135.8	126.1	187.6	191.4	221.8	197.4	161.6
9	134.2	84.7	89.1	81.9	112.7	97.2	115.2	113.3	89.2	103.1	83.3	93.6
10	73.0	78.0	120.8	138.9	149.8	116.8	129.9	155.1	111.3	122.0	123.2	62.3
11	44.6	70.8	108.5	118.4	107.4	79.5	79.8	127.3	92.0	171.4	140.6	166.2
12	150.9	140.7	98.9	121.2	130.3	131.8	146.5	171.8	183.1	251.0	233.7	232.2
13	151.9	176.6	169.3	156.5	150.8	122.4	119.4	128.7	169.4	225.5	169.4	164.9
14	137.6	126.9	131.5	136.9	157.6	178.5	157.5	125.3	97.3	159.0	180.6	159.7
15	131.5	108.8	125.1	125.1	118.5	94.1	84.3	155.9	179.4	217.0	172.4	160.3
16	110.9	72.0	87.5	106.3	93.5	77.8	39.2	150.3	107.6	154.1	144.7	125.7
17	157.3	143.5	91.2	99.5	92.7	81.0	90.7	130.8	154.0	125.2	126.9	125.5
18	113.9	107.7	68.2	102.2	69.7	65.8	97.7	163.3	137.1	189.7	176.6	176.2
19	127.0	92.1	116.0	86.2	124.2	107.9	65.2	93.4	95.4	177.3	157.4	150.6
20	121.4	69.5	55.6	66.4	86.6	94.4	104.6	147.9	173.9	224.4	198.1	170.3

Introducidos iterativamente los datos de suelo, clima (traza), agua, características de los cultivos, y activado el modelo, se generaron los siguientes resultados: precipitación efectiva, evapotranspiración potencial de los cultivos, lámina de reposición, umbral de riegos, número de riegos, demanda hídrica mensual, concentración salina del suelo y rendimiento de los cultivos para los veinte años proyectados.

Los valores generados por el modelo con 56 %, 58 % de lámina de riego en exceso para el lavado de sales, correspondientes a los cultivos de papa y alfalfa, fueron considerados para efectos del análisis económico de los mismos. Además, con el propósito de ver la evolución de las sales en el suelo y los rendimientos de los dos cultivos, se corrió el modelo PROSAL con una lámina de 20% en exceso, considerando la insuficiencia de agua para el riego, esto para comparar con los resultados obtenidos anteriormente.

Evolución de la salinidad de los suelos

Los resultados del proceso de simulación son la evolución de la salinidad

Tabla 25. Simulación de la evolución de la salinidad final de suelos en dS/m para una eficiencia de lavado de 0,47, siendo la C.Ea 1,52 dS/m constante y lámina que realmente se infiltra para los cultivos de papa y alfalfa (1,2; 1,56 y 1,2; 1,58)

Unupata Centro

AÑO	FACTOR DE LAMINA QUE REALMENTE SE INFILTRA			
	PAPA (1,20 y 1,56)		ALFALFA (1,20 y 1,58)	
	Conductividad eléctrica de los suelos (dS/m)		Conductividad eléctrica de los suelos (dS/m)	
1	4,77	4,77	4,77	4,77
2	7,02	4,05	5,57	4,45
3	8,26	4,00	6,26	4,26
4	7,94	3,72	6,43	4,13
5	8,01	3,72	6,30	3,81
6	8,41	3,87	6,59	3,84
7	8,79	3,95	6,96	3,88
8	9,03	3,97	7,27	3,90
9	9,12	3,93	7,61	3,92
10	9,22	3,96	7,73	3,90
11	8,34	3,73	7,75	3,85
12	9,04	3,91	7,98	3,88
13	9,31	3,97	8,29	3,92
14	9,46	3,98	8,54	3,94
15	6,99	3,20	8,30	3,77
16	7,48	3,55	8,29	3,73
17	8,26	3,88	8,47	3,80
18	8,66	3,94	8,62	3,85
19	7,42	3,35	8,23	3,64
20	7,51	3,51	8,05	3,57

de los suelos en dS/m, expresados para una lámina de riego que realmente se infiltra del 20% considerando que el agua de riego es insuficiente en la zona de estudio y los valores de 56% y 58% referente a la condición de la salinidad de los suelos en los cultivos de papa y alfalfa, éstos obtenidos en la fase de la calibración, todo ello a una eficiencia de lavado de 0,47. La simulación de la evolución de la salinidad generado por el modelo PROSAL se muestra en la Tabla 25.

La Figura 12 muestra la simulación de la evolución de la salinidad de los suelos con una lámina de riego en exceso de 20% y 56% para el cultivo de papa. La salinidad fue mayor cuando se aplicó un exceso de 20%, es decir aumentó de 4,77 dS/m a 7,51 dS/m, mientras que, cuando la lámina de riego en exceso es de 56%, la salinidad disminuyó considerablemente, o sea, de 4,77 dS/m a 3,51 dS/m, en una relación de 4,77/7,51 dS/m, igual a 0,64 para el primero y de 4,77/3,51 dS/m que da 1,35 dS/m, para el segundo; ambas con una eficiencia de lavado de 0,47 para los veinte años proyectados.

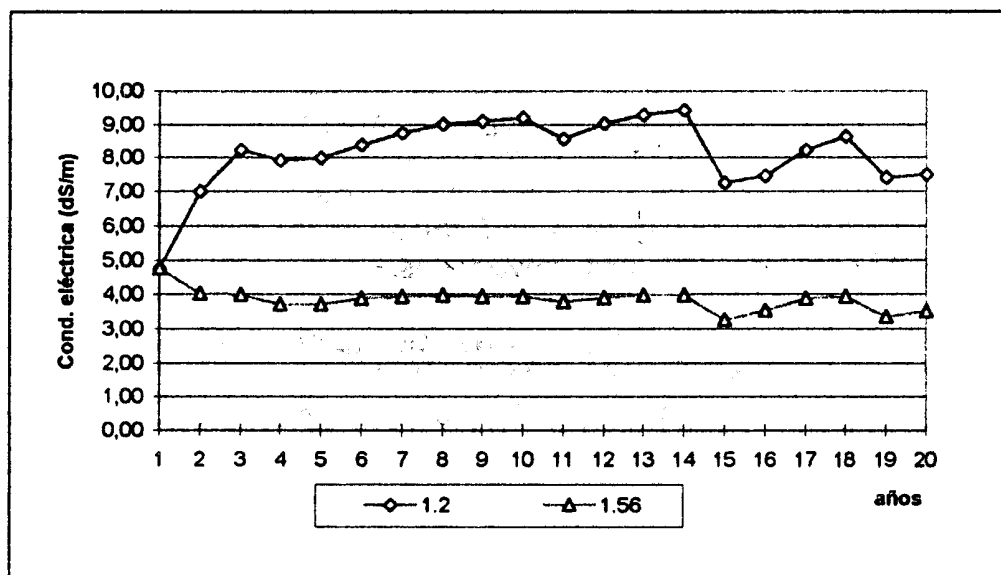


Figura 12. Simulación de la evolución de la conductividad eléctrica final de los suelos en un período de 20 años, cultivo de papa

La salinidad en el año 15 (Figura 15) evidencia una leve disminución, la misma se debió a la precipitación mayor del período de 20 años (traza), pues, la variación de sales en el suelo, se debe a la relación estrecha que existe con el agua aplicada al suelo.

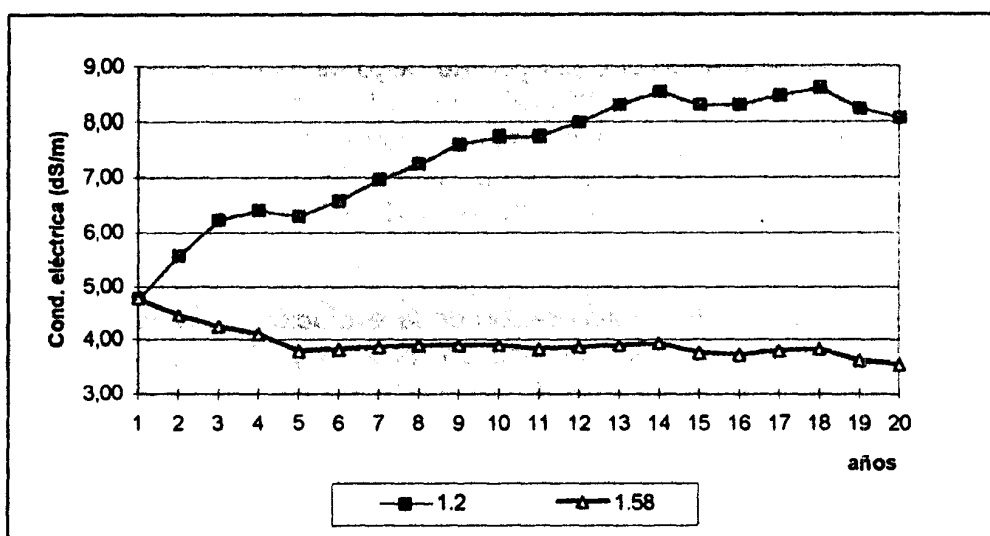


Figura 13. Simulación de la evolución de la conductividad eléctrica final de los suelos en un período de 20 años, cultivo de alfalfa

La Figura 13 evidencia la evolución de la salinidad del suelo, para el cultivo de alfalfa con una lámina de riego en exceso de 20% y 58%. Ambas dieron los siguientes resultados: la conductividad eléctrica para el primer valor asciende progresivamente de 4,77 dS/m a 8,05 dS/m, mientras que para el siguiente disminuyó de 4,77 dS/m a 3,57 dS/m; ambas con una eficiencia de lavado de 0,47 para los veinte años proyectados.

El exceso de agua aplicada con una eficiencia de lavado de 0,47, permite el lavado de sales; pues la salinidad llegó a 3,51 dS/m para la papa y de 3,57 dS/m en la alfalfa. Por lo tanto se puede decir que a mayor aplicación de agua para el lavado el efecto en el lixiviado de sales solubles de la zona radical es mayor, mientras que la aplicación de sólo un 20 % de la lámina para el lavado de sales produce el incremento de sales en la zona radical (Figuras 12 y 13).

Efecto de la salinidad de los suelos sobre el rendimiento del cultivo de papa

La activación del modelo PROSAL con base en datos agroecológicos y trazas proporcionaron resultados de rendimientos en porcentaje, los cuales fueron convertidos a Mg/ha (Tabla 26).

El proceso de entrada de datos en el modelo PROSAL, la activación y la generación de rendimientos del cultivo de papa, sirvieron de base para efectos de la evaluación económica. A continuación se muestra los datos introducidos para el sector de Unupata Centro, cultivo de papa, suelos, agua y la respectiva generación de resultados para el período de veinte años.

Características de sector

Número de años a estudiar	20
Número de sectores de riego a procesar	1.0
Nombre del sector de riego	UNUPATA CENTRO
Densidad aparente del sector (Mg/m^3)	1.3
Humedad a capacidad de campo -gravimétrico (%)	21
Humedad a punto de marchitez permanente - gravimétrico (%)	8.2
Coefficiente hidrodinámico	0.45
Eficiencia de riego global para el sector	0.50
Número de cultivos considerados en el sector de riego	1.0

Datos característicos del cultivo

Nombre del cultivo	papa
Coefficiente de desarrollo foliar del cultivo (Tabla 3 del Apéndice 5)	4.8
Coefficiente de densidad de enraizamiento (Tabla 2 del Apéndice 5)	0.35
Profundidad radicular típica (cm)	30.0
Periodo vegetativo del cultivo (meses)	5.0
Código para salida de demanda del cultivo	1.0
Código para leer los datos de precipitación	1.0
Código para leer los datos de evaporación en mm	1.0
Código para especificar la duración del cultivo	1.0

Valores para salinidad

Porcentaje de humedad del suelo a saturación en volumen (%)	0.50
Conductividad eléctrica del agua de riego (dS/m)	1.52
Conductividad eléctrica inicial en extracto de saturación (dS/m)	4.77
Eficiencia del lavado (%)	0.47
Factor para afectar la lámina de riego que se infiltra realmente	1.56 *
Pérdida de rendimiento por aumento unitario de salinidad (b) (%/dS/m)	12
Salinidad umbral para el cultivo (S_u) (dS/m)	1.7
Número de hectáreas a regar para el año 1	1.0
% del área a sembrar para el sector 1	100
Mes de siembra para este cultivo en el sector 1	10
Las trazas de precipitación y evaporación generados por el modelo HEESMM	

Nota: (*) valor de calibración.

La activación del modelo PROSAL con base en datos anteriormente señalados proporcionaron los siguientes resultados de rendimientos en porcentaje, los cuales fueron convertidos a Mg/ha (Tabla 26).

Tabla 26. Simulación de la evolución del rendimiento y conductividad eléctrica final por periodo de siembra establecido para el cultivo de papa a una eficiencia de lavado de 0,47, C.E.e de 4,77 dS/m y factor de lámina de riego que realmente se infiltra de 1,20 y 1,56.

Periodo	Conductividad eléctrica final	Rendimiento a 20% de lámina de riego en exceso	Conductividad eléctrica final	Rendimiento a 56% de lámina de riego en exceso
Ciclo	dS/m (1,2)	Mg/ha	dS/m (1,56)	Mg/ha
1	4,77	3,40	4,77	3,50
2	7,02	1,49	4,05	3,74
3	8,26	1,20	4,00	3,84
4	7,94	1,28	3,72	3,93
5	8,01	1,13	3,72	3,88
6	8,41	0,89	3,87	3,81
7	8,79	0,69	3,95	3,78
8	9,03	0,60	3,97	3,78
9	9,12	0,54	3,93	3,79
10	9,22	0,65	3,96	3,85
11	8,34	0,71	3,73	3,86
2	9,04	0,53	3,91	3,79
13	9,31	0,40	3,97	3,77
14	9,46	1,12	3,98	4,06
15	6,99	1,74	3,20	4,19
16	7,48	1,34	3,55	3,93
17	8,26	0,98	3,88	3,81
18	8,66	1,24	3,94	3,97
19	7,42	1,60	3,35	4,10
20	7,51	1,37	3,51	3,96

Los resultados de la Tabla 26 permiten deducir que el rendimiento del cultivo de papa fue afectado considerablemente por la lámina de riego que realmente se infiltra correspondiente a 1,56; es decir 56% de la lámina de riego en exceso, a una conductividad eléctrica del agua de 1,52 dS/m y eficiencia de lavado de 0,47. Lo que significa un incremento en rendimiento de la papa, mientras que la salinidad disminuye relativamente en el tiempo predeterminado.

El factor 1,56 de lámina de agua que realmente se infiltra en el suelo, es decir 56% en exceso de la lámina de riego y la eficiencia de lavado 0,47 (47%), permitieron obtener un rendimiento de 3,50 Mg/ha a 3,96 Mg/ha y, la correspondiente salinidad disminuyó de 4,77 dS/m a 3,51 dS/m para el primero y vigésimo año, respectivamente. La disminución de la conductividad eléctrica se debió principalmente al excedente de lámina de riego aplicada para el lavado de sales, que como consecuencia tiene su efecto sobre el rendimiento de la papa en el período considerado.

La relación por el cambio de productividad debido a la aplicación de la lámina de riego en exceso en 20 % y 56% comienza desde 1,03, es decir, 3,50/3,40 toneladas por hectárea para el primer año; 2,51 Mg/ha, o sea, 3,74/1,49 megagramos por hectárea, correspondiente al segundo año y a partir

de éste último existe una sucesión hasta el año veinte donde la relación es de 2,89, es decir de 3,96 Mg/ha con 1,37 Mg/ha, respectivamente.

La Figura 14 representa la evolución de los rendimientos del cultivo de papa por el efecto de la salinidad, con base en los factores de 1,2 y 1,56 de lámina que realmente se infiltra, es decir, 20% y 56% de lámina de riego en exceso para fines de lavado de sales. Además, muestra las curvas por el cambio de productividad del cultivo en cuestión a los efectos señalados.

La evolución del rendimiento de la papa con una lámina de riego en exceso de un 20%, disminuyó considerablemente en el tiempo de 3,40 Mg/ha a 1,37 Mg/ha, esto debido principalmente a que el agua aplicada no es suficiente para la producción normal y mucho menos para el lavado de sales. Pero cuando la lámina fue 56%, el rendimiento aumentó con relación al anterior de 3,50 Mg/ha a 3,96 Mg/ha donde las condiciones fueron inversas al anterior, ambas por el período de 20 años. Por lo tanto el cambio de productividad para la papa está condicionada por la aplicación de lámina de riego que realmente se infiltra a la misma eficiencia de lavado 0,47 en la capa arable, es decir, a una profundidad de 23 cm.

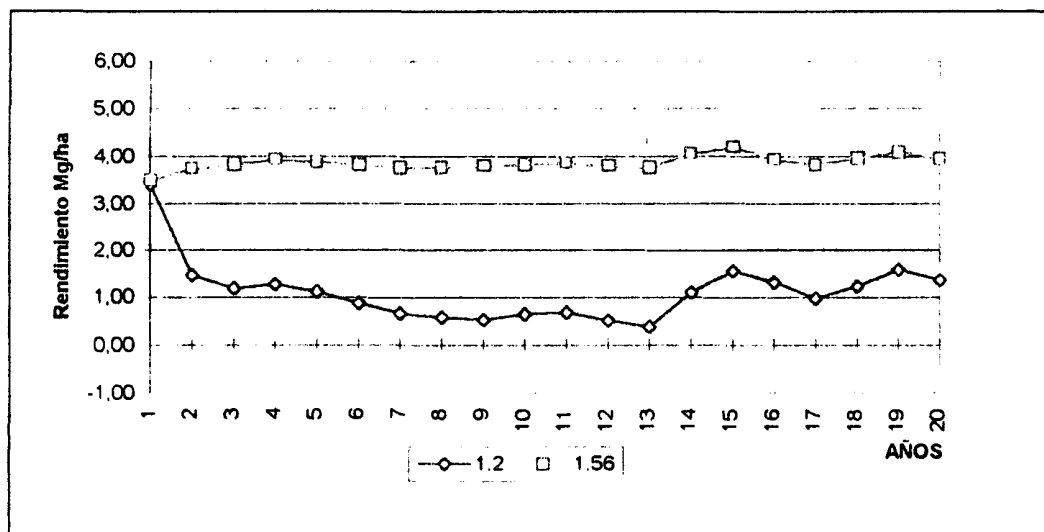


Figura 14. Evolución del rendimiento de papa en Mg/ha a 0,47 de eficiencia de lavado y el factor de 1,2 y 1,56 (20% y 56%) de lámina de riego que realmente se infiltra (perspectiva por 20 años)

Nota: Los porcentajes de los rendimientos relativos simulados son convertidos en Mg/ha, a través, del proceso matemático de los rendimientos óptimos potenciales de 5,18 Mg/ha y 8,50 Mg/ha para los cultivos de papa y alfalfa. Estos valores que se obtuvieron por informe de los productores y técnicos de organismos no gubernamentales de la zona, señalando que en ausencia de sales, éstos podrían ser los rendimientos potenciales de los cultivos en el área.

La Figura 14 señala que, cuando se aplica una cierta cantidad de agua en exceso con una eficiencia de lavado de 0,47 existe una alta probabilidad de aprovechamiento del agua de riego por el cultivo y, consecuentemente, se logra el incremento en rendimiento del cultivo de papa; llegando la salinidad hasta 3,51 dS/m. Por lo tanto, se puede decir que fue la lámina de riego en exceso que ocasionó un ligero aumento en el rendimiento de la papa. Además, dicho incremento en rendimiento de la papa en los años 14, 15 y 16 de alguna manera está influenciado por la precipitación generada por el modelo HEESMM.

Cuando el factor fue de 1,20 con la misma eficiencia de lavado, se proyectaron rendimientos bajos, de 3,40 Mg/ha el primer año y 1,37 Mg/ha para el vigésimo año, respectivamente; o sea, que a menor cantidad de agua aplicada mayor grado de salinidad en el suelo, y como resultado de esto, se presenta una disminución en rendimiento de papa.

Efecto de la salinidad de los suelos sobre el rendimiento del cultivo de alfalfa

La activación del modelo PROSAL con base en datos de suelo, clima (traza), agua y agronómicos de la alfalfa, además de la eficiencia de lavado y el factor de lámina de riego que realmente se infiltra en el suelo por el período de 20 años, proporcionaron rendimientos que se indican en la Tabla 27.

El proceso de entrada de datos fue realizado iterativamente para el cultivo de alfalfa, tal como se detalla a continuación:

Características de sector

Número de años a estudiar	20
Número de sectores de riego a procesar	1,0
Nombre del sector de riego	UNUPATA CENTRO
Densidad aparente del sector (Mg/m ³)	1,30
Humedad a capacidad de campo -gravimétrico (%)	21
Humedad a punto de marchitez permanente - gravimétrico (%)	8,2
Coefficiente hidrodinámico	0,45
Eficiencia de riego global para el sector	0,50
Número de cultivos considerados en el sector de riego	1,0

Datos característicos del cultivo

Nombre del cultivo	alfalfa
Coefficiente de desarrollo foliar del cultivo (Tabla 3, Apéndice 5)	6,0
Coefficiente de densidad de enraizamiento (Tabla 2, Apéndice 5)	0,41
Profundidad radicular típica (cm)	100
Periodo vegetativo del cultivo (meses)	6,0

Código para salida de demanda del cultivo	1,0
Código para leer los datos de precipitación	1,0
Código para leer los datos de evaporación en mm	1,0
Código para especificar la duración del cultivo	0,0
El kc medio mensual para el cultivo de alfalfa (Grassi, 1993)	0,97

Valores para salinidad

Porcentaje de humedad del suelo a saturación en volumen (%)	0,50
Conductividad eléctrica del agua de riego (dS/m)	1,52
Conductividad eléctrica inicial en extracto de saturación (dS/m)	4,77
Eficiencia del lavado (%)	0,47
Factor para afectar la lamina de riego que se infiltra realmente	1,58 *
Perdida de rendimiento por aumento unitario de salinidad (b) (%/dS/m)	7,2
Salinidad umbral para el cultivo (su) (dS/m)	3,5
Número de hectáreas a regar para el año 1	1,0
% del área a sembrar para el sector 1	100
Mes de siembra para este cultivo en el sector 1	10
Conjuntamente, las trazas de precipitación y evaporación generados por el modelo	

Nota: (*) indica el valor de calibración.

Los resultados proyectados por efecto de las sales en el cultivo de alfalfa, expresan un rendimiento elevado cuando la lámina en exceso es de 58%, mayor que el cultivo de papa, aunque dicha comparación no es adecuada por el tipo de cultivo.

En la Tabla 27 se expresan los resultados de salinidad de los suelos y el efecto sobre los rendimientos en la alfalfa a los valores de 1,58 de lámina de riego que realmente se infiltra y de 0,47 de eficiencia de lavado en el tiempo. Los rendimientos obtenidos con la alfalfa en las condiciones indicadas fueron los siguientes: de 7,82 Mg/ha a 8,42 Mg/ha un aumento a razón de 0,6 Mg/ha y de 4,77 dS/m hasta 3,57 dS/m. de conductividad eléctrica en el suelo para el primer y vigésimo año, correspondientemente.

El valor de 1,58 correspondiente al factor de lámina de riego que realmente se infiltra en el suelo y la eficiencia de riego de 0,47, muestran la disminución de la conductividad eléctrica en el suelo, es decir, el lavado de sales, que a su vez repercute en el aumento en rendimiento de la alfalfa de 7,82 Mg/ha a 8,42 Mg/ha para el periodo de 20 años.

Tabla 27. Evolución del rendimiento y conductividad eléctrica final por periodo de siembra establecido para el cultivo de alfalfa a una eficiencia de lavado de 0,47, C.E.e de 4,77 dS/m y factor de lámina de riego que realmente se infiltra de 1,20 y 1,58

Periodo	Conductividad eléctrica final	Rendimiento (1,20)	Conductividad eléctrica final	Rendimiento (1,58)
ciclo	dS/m (1,2)	Mg/ha	dS/m (1,58)	Mg/ha
1	4,77	7,48	4,77	7,82
2	5,57	7,02	4,45	7,98
3	6,26	6,76	4,26	8,08
4	6,43	6,75	4,13	8,21
5	6,30	6,70	3,81	8,30
6	6,59	6,49	3,84	8,28
7	6,96	6,29	3,88	8,26
8	7,27	6,09	3,90	8,25
9	7,61	5,95	3,92	8,25
10	7,73	5,91	3,90	8,27
11	7,75	5,83	3,85	8,27
12	7,98	5,66	3,88	8,25
13	8,29	5,49	3,92	8,25
14	8,54	5,49	3,94	8,29
15	8,30	5,57	3,77	8,35
16	8,29	5,52	3,73	8,34
17	8,47	5,41	3,80	8,30
18	8,62	5,48	3,85	8,35
19	8,23	5,66	3,64	8,43
20	8,05	5,64	3,57	8,42

El rendimiento de la alfalfa con una lámina de riego en exceso del 20%, disminuyó considerablemente en el tiempo de 7,48 Mg/ha a 5,64 Mg/ha; esto debido principalmente a que el agua aplicada no es suficiente para la producción normal y mucho menos para el lavado de sales. El exceso de un 20% de agua aplicada al suelo se debe a que toda se usa en evapotranspiración.

Cuando la lámina en exceso fue de 58%, el rendimiento aumentó con relación al anterior de 7,82 Mg/ha a 8,42 Mg/ha; aquí las condiciones fueron inversas a la anterior, ambas por el periodo de 20 años. Por lo tanto el cambio de productividad, como en el anterior cultivo, está condicionado por la aplicación de la lámina de riego que realmente se infiltra con la misma eficiencia de lavado de 0,47 a una profundidad de 23 cm.

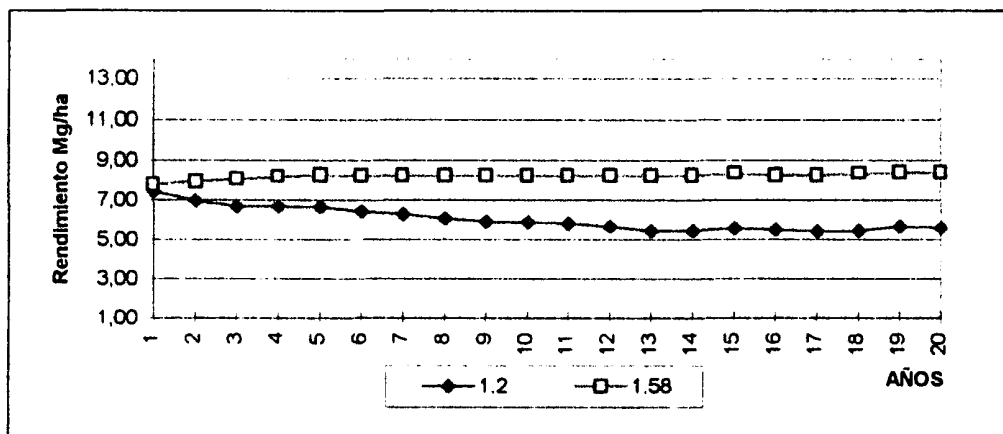


Figura 15. Evolución en rendimiento del cultivo alfalfa con datos generados por el modelo PROSAL en Mg/ha y 0,47 de eficiencia de lavado y lámina de riego que realmente se infiltra de 1,2 y 1,58.

La Figura 15 representa la evolución en rendimiento de la alfalfa por el efecto de la salinidad, con base en los valores de 1,2 y 1,58 de lámina de riego que realmente se infiltra. Cuando se proporcionó una lámina de agua en exceso de 58%, para el lavado de sales, el rendimiento aumentó a razón de 0,6 Mg/ha, es decir de 7,82 Mg/ha a 8,42 Mg/ha, mientras que el contenido de sales solubles en el suelo disminuía lentamente en el período considerado. El incremento en rendimiento de la alfalfa es sucesivo hasta el año veinte, excepto en el año 17, cuando se produce una disminución de 8,30 Mg/ha, ocasionada ésta por la precipitación generada.

La relación por el cambio de productividad debido a la aplicación de la lámina de riego en exceso en 20 % y 56% para el primero es de 1,05 (7,82 Mg/ha entre 7,48 Mg/ha); 1,14 (7,98 Mg/ha entre 7,02 Mg/ha) correspondiente al segundo año; 1,2 (8,08/6,76, en Mg/ha) para el tercer año y, hasta una relación de 1,5 en el año veinte, donde los rendimientos fueron 8,42 Mg/ha y 5,64 Mg/ha., respectivamente.

El factor de lámina de riego que realmente se infiltra en el suelo de 1,58, tuvo influencia en la evolución de la conductividad eléctrica y el rendimiento de los cultivos en el tiempo. El rendimiento del cultivo de alfalfa así obtenido para el factor de 1,58, fue aumentando paulatinamente desde 7,82 Mg/ha hasta 8,42 Mg/ha, del primero al vigésimo año, respectivamente, siendo notoria la disminución de la concentración salina en el suelo. Mientras que el factor de 1,2 de la lámina de riego que realmente se infiltra en el suelo, a la eficiencia de lavado de 0,47, proyectaron rendimientos bajos de 7,48 Mg/ha a 5,64 Mg/ha para el primero y vigésimo año, respectivamente. Es decir que la aplicación de agua en 20% en exceso se usa en evapotranspiración considerándose insuficiente para el desarrollo normal, por lo que más bien provoca el aumento

de sales en la zona radical y la disminución progresiva en rendimiento de alfalfa (Figura 15).

La comparación del rendimiento de los cultivos históricos y los generados por el modelo PROSAL, con la respectiva utilización de la técnica del cambio de productividad, proporciona los siguientes resultados para los cultivos de papa y alfalfa en promedio (Tabla, 28).

Tabla 28. Comparación de rendimientos históricos promedio de los cultivos de papa y alfalfa bajo condiciones normales de producción con los estimados por el cambio de productividad a una lámina en exceso de 1,20-1,56 y 1,2-1,58 (Mg/ha), Cantón Unupata.

Rendimiento en seco y con riego (Mg/ha)						
Histórico 1974-1988		PAPA, lám. riego exceso		ALFALFA, lám. riego exceso		
	PAPA	ALFALFA	1,20	1,56	1,20	1,56
prom	3,5	7,4	1,37	3,85	6,08	8,25

La Tabla 28 muestra los rendimientos históricos y los resultados por el cambio de productividad. El rendimiento de la papa obtenido sin riego es de 3,5 Mg/ha, mientras que bajo riego, con 20% de lámina de riego en exceso, da 1,37 Mg/ha, es decir, el aumento de 20% de lámina de agua ocasiona bajos rendimientos y aumenta la salinidad de los suelos. La aplicación de 56% para efectos de lavado de sales aumenta el rendimiento del cultivo papa, además, tiene un efecto en el lixiviado de sales con la correspondiente disminución de los mismos.

El rendimiento de la alfalfa, similarmente, muestra que al aplicar 20 % de agua en exceso, disminuye el rendimiento de este cultivo, de 6,08 Mg/ha, siendo el mismo inferior al cultivado en seco 7,4 Mg/ha. Al contrario, la lámina de riego que realmente se infiltra de 1,58, tiene un efecto positivo en el rendimiento de Mg 8,25 por hectárea. Implica que la siembra de los cultivos estudiados, no debería sembrarse con la aplicación de agua en exceso de 20%, ya que como resultado da bajos rendimientos, y a su vez, saliniza los suelos.

Estimación de los beneficios netos por el cambio de productividad, para determinar el efecto salinidad en los cultivos

A continuación se realiza la comparación de beneficios obtenidos al aplicar 1,20, 1,56 y 1,58 de lámina de riego que realmente se infiltra para los cultivos de papa y de alfalfa. Además, se obtienen los resultados por el cambio de productividad a las láminas de riego en exceso ya mencionadas. Los ingresos por el cambio de la productividad contrastan con el ingreso familiar propuesto en el taller comunal realizado en el Cantón de Unupata, ello realizado a una tasa de descuento de 10%.

Beneficios por la producción de los cultivos de papa y alfalfa

Se consideraron los beneficios económicos de la producción de papa y alfalfa por familia agrícola de cinco miembros para una superficie de 3 ha, que es lo que comúnmente un agricultor siembra; a su vez se consideró un ingreso de US\$ 4800 por año para satisfacer sus necesidades básicas, tal como resultó del taller comunal realizado en julio de 1996. Los beneficios sólo se obtienen para los valores de 1,56 y 1,58 de lámina de riego que realmente se infiltra de la papa y alfalfa, cuando el ciclo de los cultivos es de cinco y seis meses, respectivamente.

La Tabla 29 muestra los resultados de los beneficios brutos, netos y los correspondientes costos y valores de producción de los cultivos papa y alfalfa, bajo condiciones de riego, en una superficie de 1 ha.

Beneficio anuales obtenidos por el cambio de productividad al aplicar diferentes láminas de riego

Cultivo de papa

Los rendimientos procedentes de la simulación Producción Salinidad (Mg/ha), precios y costos de producción del cultivo de papa permitieron determinar los beneficios netos para el período de 20 años se muestran en la Tabla 29.

El beneficio neto obtenido por la producción del tubérculo con base en el factor 1,56 de lámina de riego que realmente se infiltra y 0,47 de eficiencia de lavado, señala que el productor en el primer año no tiene ningún ingreso, en el segundo año tiene un ingreso de US\$ 57,35 por ha, beneficios que ascienden hasta el años cuatro y luego disminuye en el año siete, manteniéndose casi constante hasta el año 10, para luego aumentar y descender, con una perspectiva final de descenso en el último año en US\$ 153,08 a 114,79 por ha, en un período de 20 años; mientras que con una lámina de riego en exceso de 1,20, no se obtiene ningún beneficio. Los rendimientos generados por el modelo muestran que en el año quince existe un aumento brusco producido por la precipitación (Tabla 29).

Tabla 29. Beneficios anuales obtenidos a diferentes láminas de riego que realmente se infiltra 1,20 y 1,56 en suelos salinos bajo riego en el cultivo de papa, perspectiva de 20 años

PERÍODO	RENDIMIENTO A 20% DE LÁMINA DE RIEGO EN EXCESO	RENDIMIENTO A 56% DE LÁMINA DE RIEGO EN EXCESO	PRECIOS DE FINCA	COSTOS DE PRODUCCIÓN	BENEFICIO NETO 20% DE LÁM. DE RIEGO EN EXCESO	BENEFICIO NETO 56 DE LÁM. DE RIEGO EN EXCESO
Ciclo	Mg/ha	Mg/ha	US\$/Mg	US\$/ha	US\$/ha	US\$/ha
1	3,40	3,50	264	930	0,0	0,0
2	1,49	3,74	264	930	0,0	57,35
3	1,20	3,84	264	930	0,0	83,33
4	1,28	3,93	264	930	0,0	106,58
5	1,13	3,88	264	903	0,0	94,27
6	0,89	3,81	264	930	0,0	75,13
7	0,69	3,78	264	930	0,0	66,92
8	0,60	3,78	264	930	0,0	68,29
9	0,54	3,79	264	930	0,0	68,29
10	0,65	3,85	264	930	0,0	69,66
11	0,71	3,86	264	930	0,0	86,07
2	0,53	3,79	264	930	0,0	90,17
13	0,40	3,77	264	930	0,0	69,66
14	1,12	4,06	264	930	0,0	64,19
15	1,74	4,19	264	930	0,0	142,14
16	1,34	3,93	264	930	0,0	106,58
17	0,98	3,81	264	930	0,0	75,13
18	1,24	3,97	264	930	0,0	117,52
19	1,60	4,10	264	930	0,0	153,18
20	1,37	3,96	264	930	0,0	114,79

Como se puede apreciar en la Tabla 29, para el primer año de lámina 1,56, no hubo beneficio, éste sólo se obtuvo a partir del segundo año. Los montos por la producción de una hectárea ascienden a US\$ 57,35 por ciclo, en el segundo año a US\$ 114,79 por ciclo; este último correspondiente al vigésimo año. Los rendimientos generados por el modelo, muestran que en el año quince existe un aumento brusco, que se debe a la precipitación.

La simulación con el valor de 20% de lámina de agua en exceso, aparte de provocar la salinización del suelo, afecta considerablemente el rendimiento de papa de 3,40 Mg/ha a 1,37 Mg/ha, y no proporcionan beneficio (Figura 16).

Cuanto mayor es la cantidad de agua aplicada al suelo y a una eficiencia de lavado de 0,47, la probabilidad de lixiviar las sales de la capa superficial del suelo es mayor, por lo tanto, la perspectiva de elevar la producción y obviamente el beneficio se incrementan considerablemente (Figura 16).

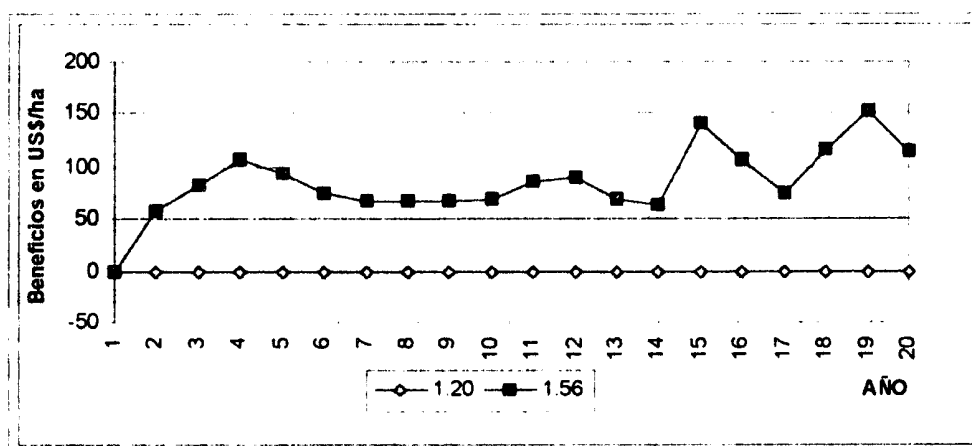


Figura 16. Beneficios anuales del cultivo de papa a láminas de riego en exceso de 20% y 56% (perspectiva de 20 años)

La Tabla 30 muestra los beneficios anuales que se obtienen por el cambio de productividad al aplicar 1,20 y 1,56 de lámina de riego que realmente se infiltra para el cultivo de papa, estos beneficios se obtienen por el contraste de los beneficios netos $B_{1,56}$ con el $B_{1,20}$, respectivamente.

Tabla 30. Beneficios anuales por el cambio de productividad para el cultivo papa a 1,20 y 1,56 de lámina de riego en exceso, periodo de 20 años

BENEFICIO	BENEFICIO NETOS OBTENIDOS A 1,20 Y 1,56 DE LAMINAS DE RIEGO QUE REALMENTE SE INFILTRA, por un periodo de veinte años																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$B_{1,56}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$B_{1,20}$	0,0	57,4	83,3	107	94,3	75,1	66,9	68,3	68,3	69,7	86,1	90,2	69,7	64,2	142	107	75,1	118	153	114,8
B_{CP}	0,0	57,4	83,3	107	94,3	75,1	66,9	68,3	68,3	69,7	86,1	90,2	69,7	64,2	142	107	75,1	118	153	114,8
Total B_{CP}	700,75*																			

* Beneficio actualizado al año 1, usando una tasa de descuento del 10%.

Ahora bien, los aumentos de beneficios por el cambio de productividad en los años 3,4,11,12,15, 18 y 19 son afectados por la precipitación que contribuye a la disminución de la salinidad en el suelo, dando lugar al aumento en el rendimiento de la papa. Por lo expuesto, los beneficios netos obtenidos en las tres hectáreas de siembra de este tubérculo no cubre el ingreso de US\$ 4800 por año que debería percibir un agricultor con familia.

Cultivo de alfalfa

Los beneficios del cultivo de alfalfa debidos al factor de riego que realmente se infiltra de 1,20 y 1,58 proporcionaron resultados relativamente superiores al cultivo de papa. La siembra de 1 ha de este forraje, dio como beneficio neto para el productor en el primer año, US\$ 1297,50 por ha, a 1,20 de lámina de riego en exceso; US\$ 1144,4 por ha para el tercer año, hasta US\$ 855,24 por ha para el último año, en un periodo de 20 años. En consecuencia,

esta lámina de riego que realmente se infiltra disminuye los beneficios en el tiempo. La siembra de tres hectáreas de alfalfa proporcionó un beneficio para el primer año por familia de US\$ 3892,5 por año. La eficiencia de lavado y el factor de lámina de riego fueron 0,47 y 1,20, respectivamente (Tabla 31).

Los valores de 0,47 de eficiencia de lavado y 1,58 del factor de lámina de riego que realmente se infiltra, ambos obtenidos en la calibración, permitieron evaluar el rendimiento, que expresado en beneficio, proyectó beneficios más ventajosos que el cultivo de papa. Por consiguiente, los rendimientos y los beneficios tienden a aumentar en el tiempo por la disminución de la salinidad de los suelos.

Tabla 31. Beneficios anuales obtenidos a diferentes láminas de riego que realmente se infiltra 1,20 y 1,58 en suelos salinos bajo riego en el cultivo de alfalfa, perspectiva 20 años

PERÍODO	RENDIMIENTO A 20% DE LÁMINA DE RIEGO EN EXCESO	RENDIMIENTO A 58% DE LÁMINA DE RIEGO EN EXCESO	PRECIOS DE FINCA	COSTOS DE PRODUCCIÓN	BENEFICIO NETO 20% DE LÁM. DE RIEGO EN EXCESO	BENEFICIO NETO 58% DE LÁM. DE RIEGO EN EXCESO
Ciclo	Mg/ha	Mg/ha	US\$/Mg	US\$/ha	US\$/ha	US\$/ha
1	7,75	7,82	210	330	1297,50	1312,20
2	7,02	7,98	210	330	1144,4	1346,2
3	6,76	8,08	210	330	1089,08	1365,75
4	6,75	8,21	210	330	1087,29	1394,31
5	6,70	8,30	210	330	1076,58	1413,95
6	6,49	8,28	210	330	1033,74	1408,59
7	6,29	8,26	210	330	990,90	1405,02
8	6,09	8,25	210	330	948,06	1401,45
9	5,95	8,25	210	330	919,50	1401,45
10	5,91	8,27	210	330	910,58	1406,81
11	5,83	8,27	210	330	894,51	1406,81
12	5,66	8,25	210	330	858,81	1403,24
13	5,49	8,25	210	330	823,11	1399,67
14	5,49	8,29	210	330	823,11	1410,38
15	5,57	8,35	210	330	839,18	1422,87
16	5,52	8,34	210	330	828,47	1421,09
17	5,41	8,30	210	330	807,05	1413,95
18	5,48	8,35	210	330	821,33	1422,87
19	5,66	8,43	210	330	858,81	1440,72
20	5,64	8,42	210	330	855,24	1437,15

Los beneficios resultantes para la alfalfa, a 1,58 de lámina en exceso, en el primer año fueron de US\$ 1312,20 por ciclo/ha. Ellos aumentan relativamente hasta un beneficio neto de US\$ 1437,15 por ciclo/ha, correspondiente al vigésimo año. En consecuencia, la producción de tres hectáreas proporciona, para el primer año, US\$ 3936,6 por ciclo, y US\$ 4311,45 por ciclo para el último año de estudio, variación que es atribuida a la salinidad.

Los resultados proporcionados indican que cuanto mayor es la cantidad de agua que se aplica al suelo y a una misma eficiencia de lavado (0,47), el lavado de sales en la capa superficial del suelo es mayor, por lo tanto, la perspectiva de elevar la producción de forraje también se incrementa considerablemente. En consecuencia, aquellos suelos de textura pesada considerados para el estudio, son relativamente adecuados para la producción del cultivo de alfalfa (Figura 17).

La factibilidad de incrementar la siembra del cultivo de alfalfa estará condicionada al manejo y conservación de los suelos, por lo tanto, la probabilidad de mejorar el beneficio anual de US\$ 4311,45 por ciclo estará en la capacidad y dedicación del agricultor y en la asistencia técnica proporcionada al mismo (Figura 17).

Cuando la lámina de riego en exceso fue de 20%, a una eficiencia de lavado de 47%, la siembra de alfalfa en estas condiciones fue restringida, pues el rendimiento disminuye año tras año de 7,75 Mg/ha a 5,64 Mg/ha; con unos beneficios de US\$ 1297,50 a US\$ 855,24 por ha, correspondientes a los años primero y vigésimo (Figura 15).

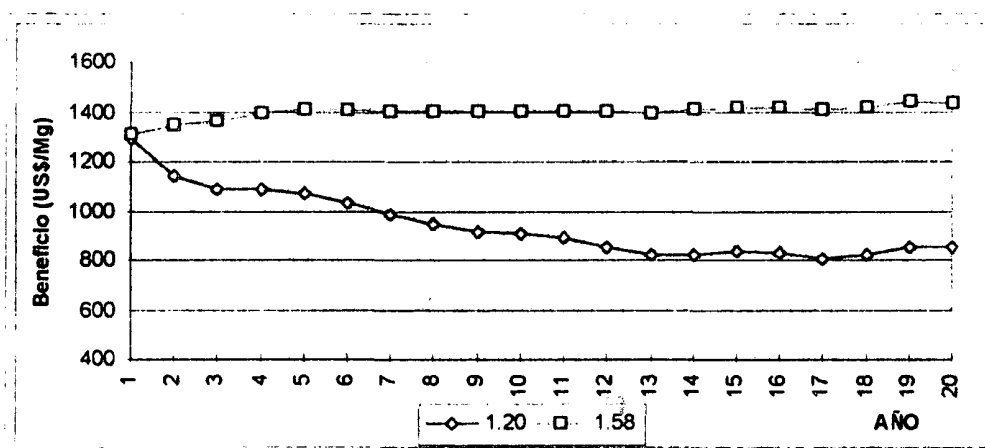


Figura 17. Beneficios anuales del cultivo de alfalfa a láminas de riego en exceso de 20% y 58% (perspectiva de 20 años)

Por consiguiente, la posibilidad de elevar la producción del tubérculo (papa) y forraje (alfalfa), está relacionada con la eficiencia de lavado (47%) y la lámina de riego que realmente se infiltra (56% y 58% de lámina de riego en exceso), además de la composición textural y las labores agrotécnicas de los suelos.

La Tabla 32 muestra los beneficios anuales que se obtienen por el cambio de productividad al aplicar 1,20 y 1,56 de lámina de riego que realmente se

infiltra para el cultivo de alfalfa, estos beneficios se obtienen por el contraste de los beneficios netos $B_{1,58}$ con el $B_{1,20}$, respectivamente.

Tabla 32. Beneficios anuales obtenidos por el cambio de productividad para el cultivo de alfalfa al aplicar 1,20 y 1,58 de lámina de riego que realmente se infiltra en una perspectiva de 20 años

	BENEFICIO NETO A LÁMINA DE RIEGO QUE REALMENTE SE INFILTRA 1,58 $B_{1,58}$	BENEFICIO NETO A DE LÁMINA DE RIEGO QUE REALMENTE SE INFILTRA 1,20 $B_{1,20}$	BENEFICIOS POR CAMBIO DE PRODUCTIVIDAD $(B_{1,58} - B_{1,20})$
AÑO	US\$/ha	US\$/ha	US\$/ha
1	1297,50	1312,20	14,70
2	1144,4	1346,2	201,71
3	1089,08	1365,75	276,68
4	1087,29	1394,31	307,02
5	1076,58	1413,95	337,37
6	1033,74	1408,59	374,85
7	990,90	1405,02	414,12
8	948,06	1401,45	453,39
9	919,50	1401,45	481,95
10	910,58	1406,81	496,23
11	894,51	1406,81	512,30
12	858,81	1403,24	544,43
13	823,11	1399,67	576,56
14	823,11	1410,38	587,27
15	839,18	1422,87	583,70
16	828,47	1421,09	592,62
17	807,05	1413,95	606,90
18	821,33	1422,87	601,55
19	858,81	1440,72	581,91
20	855,24	1437,15	581,91
Total	34634,36	84103,07	3496,22

* Beneficio actualizado usando una tasa de descuento del 10%.

Beneficios netos por ciclo de cultivo sin riego

La Tabla 33 muestra los resultados de los beneficios brutos, netos y los correspondientes costos y valores de producción, a puerta de finca, de los cultivos de papa y alfalfa, en suelos salinos bajo condiciones de **secano** por hectárea. Los precios y costos de producción se obtuvieron en el taller comunal señalado anteriormente; por lo tanto, para efectos de estudio y comparación con los obtenidos por el modelo, los beneficios fueron hechos para la gestión agrícola 95/96, los mismos que se supuso constantes para la estimación de los beneficios de los cultivos señalados.

Cultivo de papa

Los beneficios netos obtenidos bajo condiciones de secano es bajo, esto es, la producción del cultivo de papa sin riego generó un ingreso de sólo de US\$ 1,6 por ha/ciclo. La distribución de este ingreso por ciclo del cultivo, para el agricultor, fue un valor paupérrimo de 0,32 centavos de dólar por mes. En consecuencia, en la siembra de 3 ha de papa el ingreso familiar por mes fue de 0,96 centavos de dólar (Tabla 33).

Tabla 33. Beneficios netos de los cultivos de papa y alfalfa bajo condiciones normales de producción - Cantón de Unupata

BENEFICIOS NETOS EN CONDICIONES DE SECANO (US\$/ha)										
PAPA						ALFALFA				
AÑO	RENDIMIENTO Mg/ha	PRECIO FINCA US\$/Mg	BENEFICIO BRUTO US\$/ha	COSTO PRODUCC US\$/ha	BENEFICIO NETO US\$/ha	RENDIMIENTO Mg/ha	PRECIO FINCA US\$/Mg	BENEF. BRUTO US\$/ha	COSTO PRODUCCN US\$/ha	BENEFICIO NETO US\$/ha
95-96	3.5	257.6	901.6	900	1.6	7.4	200	1443	300	1143

Cultivo de alfalfa

Los beneficios del cultivo de alfalfa bajo las mismas condiciones de producción y época, proporcionaron beneficios netos de US\$ 1143 por ha/ciclo, siendo la diferencia mucho mayor al cultivo anterior. Por lo tanto, la siembra de tres hectáreas, proporciona un ingreso de US\$ 3429 anuales (Tabla 30).

Identificación de efectos ambientales debidos a la agricultura con y sin riego de Unupata Centro

La actividad agrícola desarrollada bajo condiciones con y sin riego en Unupata Centro, presenta un deterioro de la calidad ambiental en relación a la salinización de los suelos, que conllevan a los siguientes efectos:

- Primero. La agricultura en suelos salinos, en secano, genera un bajo rendimiento de los cultivos papa de 4,80 a 3,86 Mg/ha y la alfalfa de 6,0 a 6,20 Mg/ha. Esto, a su vez, en parte genera bajos ingresos en el agricultor dando origen a una serie de efectos, a saber: hacinamiento, desnutrición, deterioro de la salud, migración y analfabetismo.
- Segundo. La actividad agrícola con una lámina de riego en exceso de 20%, sí incrementa relativamente el rendimiento de los cultivos, pero a su vez, saliniza el suelo en el tiempo de 4,77 dS/m a 8,05 dS/m para la alfalfa y de 4,77 dS/m a 7,51 dS/m para la papa; entonces, el riego bajo estas condiciones más que mitigar acelera el proceso evolutivo de la salinización de los suelos, dando origen, a largo plazo, a rendimientos cada vez menores, aunque, los rendimientos a inicios sean superiores que los que se obtienen en secano. Entonces, los efectos que provoca el riego son mayores que los

de secano, ocasionando mayor desnutrición, deterioro de la salud, migración, etc.

En las Figuras 18 y 19 se observa el encadenamiento de los efectos ambientales generados por la actividad agrícola bajo las condiciones de riego mencionadas anteriormente y sin ellas.

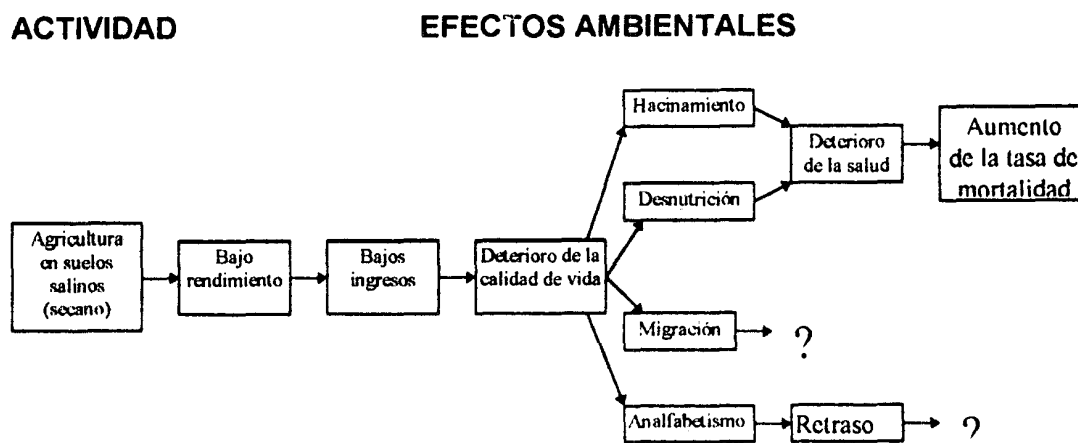


Figura 18. Encadenamiento de efectos ambientales producidos por la actividad agrícola en suelos salinos sin riego

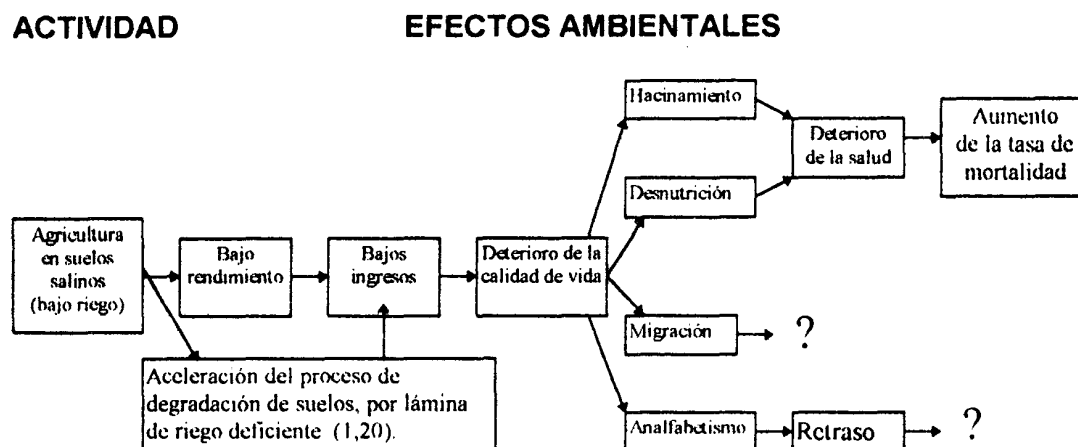


Figura 19. Encadenamiento de efectos ambientales producidos por la actividad agrícola en suelos salinos con láminas de riego no adecuadas

En las Figuras 18 y 19 se muestran las incidencias de la actividad agrícola en los suelos salinos bajo riego, destacando los efectos centrales que inciden en la situación económica de la familia, efectos que inevitablemente conducen a una baja calidad de vida. En consecuencia, impiden el mejoramiento

de las condiciones de vida, en la cadena alimenticia-nutrición-salud, como en las condiciones de la vivienda, servicios educativos y otros servicios básicos.

- Tercero. En consecuencia, la actividad agrícola, con una lámina de riego en exceso de 56% y 58%, incrementa el rendimiento de los cultivos, a su vez, la salinidad del suelo en el tiempo disminuye de 4,77 dS/m a 3,51 dS/m para la papa y de 4,77 dS/m a 3,57 dS/m para la alfalfa; entonces, el riego bajo estas condiciones disminuye el proceso evolutivo de la salinización de los suelos, dando origen a largo plazo a rendimientos cada vez mayores, siendo ellos superiores a los obtenidos en secano. Por consiguiente, los efectos que provoca el riego son mayores que los de secano y a 20% de lámina de riego en exceso, mitigando la desnutrición, el deterioro de la salud, la migración, etc.

Evaluación del impacto social por la salinidad

Para la estimación de los beneficios, obtenidos del cambio en la productividad y su comparación con el ingreso estimado para los agricultores de la zona, se procede a calcular los beneficios anuales para cada cultivo, para ello se utiliza la ecuación 5.1, y para efecto de este estudio se considera una tasa de descuento del 10%.

De las Tablas 30 y 32 se toman los beneficios acumulados por el cambio de la productividad, ellos se obtuvieron al aplicar 1,20 - 1,56 y 1,20 - 1,58 de la lámina de riego que realmente se infiltra para la papa y alfalfa. Este beneficio es estudiado aplicando la Ecuación 5.1, desarrollada a continuación:

$$B_A = B_T \frac{(1+i)^t * i}{(1+i)^t - i} \quad (5.1)$$

Donde:

- B_A = Beneficio anual (ingreso por la producción sujeto a variables)
- B_T = Beneficio total por el cambio de productividad
- t = Número de años
- i = Tasa de descuento.

Para obtener los beneficios por año, se tuvieron que considerar los beneficios netos totales por cambio de la productividad obtenidos por diferencia de las distintas láminas de riego en exceso por el periodo de veinte años, para los cultivos de papa y alfalfa, propósito que fue hecho a una tasa de interés de 10 %, basada en la Ecuación 5.1. Los precios y costos de producción se supuso constantes; para el efecto, fueron considerados de la gestión agrícola 95-96.

El beneficio anual por el cambio de productividad para el cultivo de papa y alfalfa es el siguiente:

Papa = 82,31 US\$/año
 Alfalfa = 410,66 US\$/año.

En consecuencia, si una familia necesita un ingreso de US\$ 4 800 por año, el resultado obtenido de US\$ 82,31 y US\$ 410,66 por año, señala que no alcanza a satisfacer las necesidades básicas cuando produce una hectárea. Por consiguiente, los resultados indicarían que no se debe sembrar papa ni alfalfa, debido a que el beneficio para el agricultor es de escasa significación.

Un agricultor de Unupata y su familia (cinco miembros) pueden satisfacer sus necesidades básicas con un ingreso de US\$ 4800 por año. Cuando, los beneficios obtenidos se multiplican por tres hectáreas, dan un resultado de US\$ 246,93 y US\$1231,98, para la papa y alfalfa, respectivamente. En consecuencia, con los beneficios netos estimados por el cambio de la productividad de la papa y la alfalfa no llegarían a satisfacer tales necesidades básicas (Tabla 34 y Figura 21).

Tabla 34. Ingreso anual por cambio en la productividad por familia con base en la producción de tres hectáreas del cultivo de papa y alfalfa bajo condiciones normales y de riego (perspectiva por 20 años)

BENEFICIO NETO ESTIMADO POR MES DEL CICLO VEGETATIVO (papa y alfalfa)				
SIN RIEGO (US\$/año/3ha)			CON RIEGO (US\$/año/3ha)	
BENEFIC	PAPA	ALFALFA	PAPA	ALFALFA
B_{CP}	4.80	509,70	246,93	1231,98

Los beneficios obtenidos por la producción de tres hectáreas de papa sin riego, Tabla 34 proporcionaron US\$ 4,80 por año; y el cultivo de alfalfa para la misma superficie fue de US\$ 509,70 por ciclo de cultivo. Estos ingresos en secano no satisfacen las necesidades básicas de una familia, si se compara con el ingreso básico de US\$ 4800 por año, representando un efecto negativo por la salinidad, como se muestran en la Figura 20.

La Figura 20 muestra la evolución del beneficio neto en el cultivo papa, cuando se agrega un exceso de 56% de lámina de riego para el lavado de las sales. La evolución, en beneficio, del cultivo de papa en suelos salinos es afectada por el riego o por la lámina de riego en exceso del 20 % al 56 %, lo que implica el cambio en la productividad del cultivo estudiado; no obstante, existe otro incremento debido a las precipitaciones en los años 15, 16 y 19.

En consecuencia, el incremento de los beneficios también se debe al contenido de humedad en el suelo.

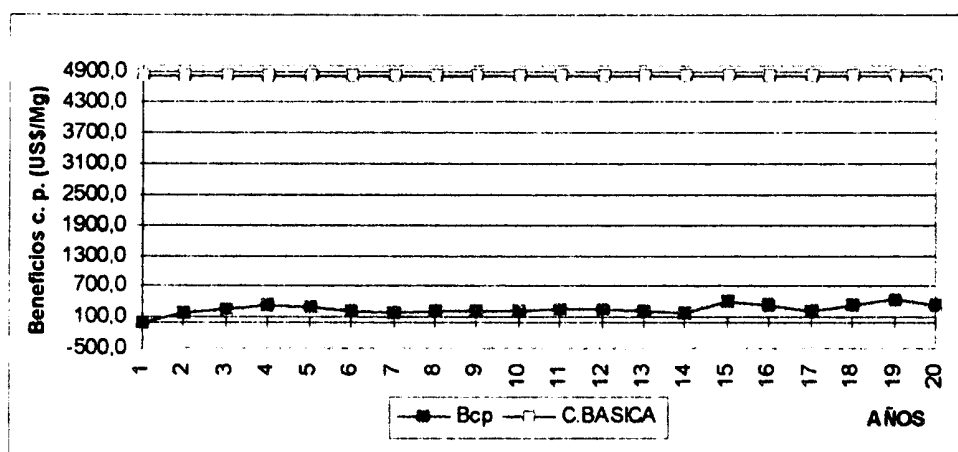


Figura 20. Impacto social por la salinidad de los suelos en la producción de papa, tasa de descuento de 10% expresadas en US\$ por año de tres ha - cesta básica

Los beneficios netos obtenidos por la producción del cultivo de alfalfa proporcionó un ingreso de US\$ 1231,98 por año y por tres ha. Este ingreso no llega a compensar las necesidades del valor de la cesta básica, lo que representa un impacto social negativo, igual que las láminas aplicadas anteriores (Figura 21).

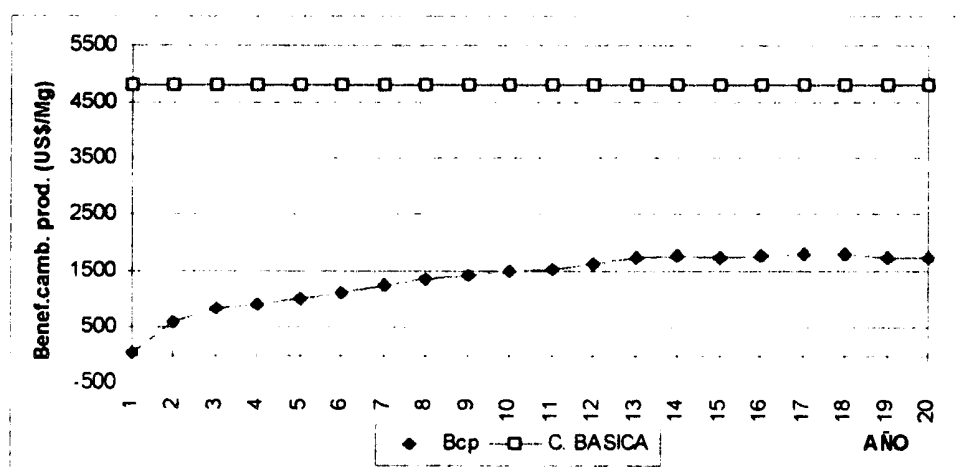


Figura 21. Impacto social por la salinidad de los suelos en la producción de alfalfa, a una tasa de descuento de 10% expresada en US\$ por año de tres ha, cesta básica.

Los beneficios que generan los cultivos de papa y alfalfa por el cambio en la productividad, bajo las mismas condiciones, señalan un ingreso de US\$ 246,93 por año y US\$ 1231,98 por año respectivamente, con una diferencia de US\$ 985,05 por año, favorable a la producción del forraje, aunque la comparación no sea apropiada por el tipo de cultivo.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los resultados obtenidos y de la discusión de los mismos, se llegó a las siguientes conclusiones y recomendaciones.

Conclusiones

Los impactos negativos generados por la salinidad de los suelos de Unupata Centro, que constituye el área de estudio, se evidencia en el bajo rendimiento de los cultivos de papa y alfalfa de 3,5 Mg/ha y 7,5 Mg/ha y el bajo nivel de vida del agricultor. Las razones se deben a la presencia de sales en los suelos y a las inadecuadas prácticas de manejo y conservación a que éstos han sido sometidos.

La metodología seguida en este trabajo, basada en el cambio de la productividad, permitió determinar el valor del recurso ligado al valor social de un bien que está en el mercado común, teniendo como base los datos históricos de producción y la evolución del grado de contaminación del recurso suelo para lograr un determinado beneficio, máximo o mínimo.

La evolución de la salinidad en la capa arable de los suelos de Unupata Centro evidencia el aumento de la conductividad eléctrica 1,56 dS/m a 4,77 dS/m, donde la conductividad eléctrica del agua de riego varió de 1,44 a 1,52 dS/m, ambas para el período del año 1974 al año 1988.

El modelo PROSAL permitió correlacionar los datos de la conductividad eléctrica del suelo medidos "*in situ*" con los simulados por el modelo y así obtener valores de eficiencia de lavado y lámina de riego que realmente se infiltra. Esto constituyó la base para la selección de los cultivos de papa y alfalfa, así como para estudiar la evolución de la salinidad en los suelos cultivados y para estimar los rendimientos a obtener en un período venidero de 20 años.

El impacto económico negativo y su efecto desfavorable en el bienestar familiar se debe en parte a los efectos de la salinización del suelo por el déficit hídrico en la zona, lo que implica seleccionar cultivos y/o forrajes aptos para la producción en las condiciones existentes. El método de riego, la calidad del agua, las características físico químicas del suelo, y el tipo de cultivo, son entre otros, los aspectos a considerar para minimizar la salinización de suelos.

Con el aumento de la lámina de riego, a fin de tener un exceso del 56% y 58% para papa y alfalfa, respectivamente, y con una eficiencia de lavado de 0,47, las sales solubles en la capa arable disminuyen, por tanto, la perspectiva

de elevar la producción también se incrementa considerablemente. Esto tuvo su efecto en los beneficios netos que aumentaron en un 267,6% en papa y 160,68 % en alfalfa.

Los resultados obtenidos indican que cuanto menor cantidad de agua se aplica, así por ejemplo, de 20% y a una eficiencia de lavado de 0,47; la salinidad en la capa superficial del suelo a mediano plazo es mayor, por lo tanto la producción de papa y alfalfa disminuye considerablemente de 3,40 Mg/ha a 1,37 Mg/ha para el tubérculo y de 7,75 Mg/ha a 5,64 Mg/ha, para el forraje. En consecuencia, se evidencia la disminución de los beneficios a largo plazo.

De lo expuesto puede extraerse que a un agricultor promedio de Unupata, la siembra de 3 ha de papa, a una tasa de descuento de 10%, le proporcionaría un beneficio de US\$ 246,93 por año, mientras al sembrar alfalfa en la misma superficie, el beneficio a obtener sería US\$ 1231,98 por año, con un incremento en US\$ 985,05 por año.

La actividad agrícola desarrollada en suelos salinos bajo condiciones con y sin riego presenta un deterioro de la calidad ambiental en dos magnitudes: a) la agricultura en secano da lugar a rendimientos muy bajos, generando bajos ingresos y dando origen a una serie de efectos negativos, entre los que se menciona: desnutrición, deterioro de la salud y migración; b) mientras que la actividad con riego aumenta relativamente el rendimiento y saliniza el suelo en el tiempo, por lo que más que mitigar, acelera el proceso evolutivo de las sales en el suelo.

La factibilidad de incrementar la siembra de papa y alfalfa para alcanzar los beneficios expuestos estará condicionada al apropiado manejo y conservación de los suelos, a la capacidad y dedicación del agricultor, a la asistencia técnica y a la consideración de los demás factores de la producción.

Del resultado de la evaluación económica de la producción agrícola, se puede concluir que esta actividad no muestra un beneficio acorde con los objetivos del agricultor; por lo que se debe tomar la decisión de cambiar el cultivo y/o la aplicación de correctivos tendientes a mejorar los suelos.

En la valoración económica del efecto de la salinidad de los suelos puede utilizarse el modelo PROSAL, así también como para determinar qué cultivos sembrar en áreas específicas, para simular la evolución de la salinidad en los suelos, estudiar el comportamiento de la precipitación efectiva, evapotranspiración de los cultivos, lámina de reposición, umbral de riego y demanda hídrica mensual. Siempre y cuando se disponga información de suelo, clima, cultivo, salinidad en los suelos y aguas, y rendimiento potencial de los cultivos.

Recomendaciones

Para reforzar los resultados encontrados en el presente trabajo debe continuarse con estudios similares utilizando otros cultivos. Además, se deben recopilar datos como: características físicas y químicas de los suelos, agronómicas de los cultivos, calidad del agua de riego y características socioeconómicas, para determinar el rendimiento potencial de los diferentes cultivos en la zona y otras áreas circundantes al estudio.

Mejorar las condiciones agronómicas del suelo para que la eficiencia de aplicación de riego sea adecuada, esto se lograría a través de la nivelación de suelos siempre y cuando las condiciones del suelo lo permitan, redimensionamiento de parcelas de riego por la escasez de agua, asistencia técnica y la participación activa del productor.

Para lograr las mejoras socio económicas y satisfacción de las necesidades prioritarias de las comunidades, se requiere de proyectos de inversión pública y/o privada, en los cuales las actividades de desarrollo se realicen con participación de la comunidad, con el solo objetivo de mantener el bienestar de los habitantes y permanencia en la zona.

Incentivar la habilitación de terrenos no aptos para fines agrícolas, a través de la siembra de especies halófitas para favorecer el desarrollo sostenible de la agricultura en la zona utilizando aguas del río Desaguadero, sustentado esta planificación en un análisis ambiental.

Aprovechar la experiencia de la reciprocidad de trabajo en la población de Unupata llamado "Ayni" para el desarrollo comunitario y el manejo de los recursos existentes, como es la relación suelo-agua. Organizando comités de riego, junta de productores, y otros

Realizar estudios e investigaciones a corto y mediano plazo, para obtener mayor y mejor conocimiento de los recursos existentes en el Cantón de Unupata y en la región, con el único propósito de lograr una mejor información sobre el valor actual y potencial de los recursos naturales, datos básicos para cualquier proceso de toma de decisión para lograr el desarrollo local, basado en un aprovechamiento racional de los recursos existentes en el Cantón.

