
CAPITULO 4

USO EFICIENTE DEL AGUA EN RIEGO

Poliotropo Martínez-Austria

MARCO GENERAL

Una crisis de escasez

Entre los especialistas en recursos hidráulicos, es cada vez más fuerte el convencimiento de que nos encontramos al inicio de una grave crisis de escasez de agua para la irrigación -y para los otros usos-. Esta crisis tiene proporciones internacionales, abarcará regiones densamente pobladas (ver por ejemplo Schiller, 1992), Jensen, 1990) y Biswas, 1992), y se manifiesta ya en algunas regiones del mundo, como el medio oriente o el suroeste de los Estados Unidos. Esta carencia de agua puede ser para muchos países uno de los factores limitantes más severos para lograr un desarrollo sustentable y, en algunos casos, podría inclusive ocasionar conflictos entre naciones.

Según Starr (1992), desde principios de 1980 los servicios de inteligencia de los Estados Unidos de América estimaron que habría diez regiones en el mundo que podrían llegar a entrar en estado de guerra por causa de los recursos hidráulicos. Las cuencas internacionales potencialmente más conflictivas parecen ser la del río Jordán (que comparten Israel y Jordania, principalmente), el río Eufrates (cuyo origen está en Turquía, cruza Siria y es la principal fuente de recursos hidráulicos del Iraq) y el Nilo (del cual depende Egipto, pero que tiene su origen y cruza otros varios países del norte de Africa). Según Tved (1992), Siria e Iraq estuvieron a punto de un conflicto bélico por causa del agua del río Eufrates, y el rey Hussein ha declarado que lo único que los haría entrar de nuevo en guerra sería el agua.

Una característica importante de la crisis del agua es su naturaleza regional. En efecto, en muchos países del hemisferio norte, especialmente los más desarrollados, no se padece de una notable carencia del recurso. Ello ha ocasionado que muchos estudios prospectivos y programas globales, usualmente realizados por instituciones fuertemente influidas por los países del norte, adolezcan de enfoques y propuestas que den la suficiente importancia a esta problemática.

En el reciente Seminario Internacional sobre Uso Eficiente del Agua organizado por la Comisión Nacional del Agua (CNA), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y la Asociación Internacional de Recursos Hidráulicos (AIRH), se presentaron 204 artículos, provenientes de 24 países del mundo, lo que muestra el gran interés en el tema. Sin embargo, es sintomático que sólo el 27% de ellos provenían de los países industrializados del norte.

La American Water Works Association, por citar un ejemplo, estima (Maddaus, 1987) que en los Estados Unidos, hacia el año 2000, sólo alrededor de 20 por ciento del país sufrirá ocasionalmente de restricciones severas al abastecimiento de agua. La mayor parte de ellas ocurrirán en las regiones áridas y semiáridas del suroeste.

Los estudios sobre medidas destinadas a lograr un uso más eficiente del recurso, no han sido suficientemente impulsados hasta ahora. Los requerimientos (y oportunidades) para nuevas tecnologías ahorradoras son cada vez más notorios, como puede deducirse también de la gran participación de representantes de diversos países en el antes citado Seminario Internacional sobre Uso Eficiente del Agua.

Por otra parte, esta crisis de cantidad, está interactuando con otra no menos preocupante: la del deterioro del medio ambiente. Este deterioro afectará no sólo directamente a la calidad del agua, sino que también a los cambios en los regímenes de precipitación y escurrimiento, como consecuencia del calentamiento global de la atmósfera, será un factor que en algunas regiones afectará la cantidad de agua disponible.

Puede considerarse que la disponibilidad de agua se encuentra tan interrelacionada con los cambios en el medio ambiente y la contaminación, que es imposible cualquier análisis del uso eficiente del agua sin referirse, como un aspecto esencial, a la conservación del medio.

Desarrollo sustentable y uso eficiente del agua

El modelo tecnológico hasta ahora elaborado, basado en la explotación de los recursos naturales, está agotado. Ahora es necesario un radical cambio de enfoque: del uso indiscriminado del capital natural, a su conservación y aprovechamiento en equilibrio ambiental.

El desarrollo económico y social desafortunadamente parece en el modelo tecnológico actual contraponerse con la conservación del medio ambiente. Los países del tercer mundo, sin embargo, no pueden resignarse al subdesarrollo y la pobreza.

De esta contradicción, en búsqueda de su solución, ha emergido un nuevo concepto, que aún ha de ser convertido en realidad, pero que debe dirigir cualquier discusión sobre el aprovechamiento de los recursos naturales: el desarrollo sostenible.

No se puede profundizar más en este texto en la importancia de este concepto, que puede resumirse diciendo que la sostenibilidad del desarrollo económico y social se base en toda actividad que no viole las leyes naturales. Para un estudio más detallado se recomienda ver CEPAL, 1991.

Para tener en perspectiva la importancia del desarrollo sostenible como concepto central, basta mencionar que el primer principio de la Declaración de Río (ONU, 1992) enuncia que los seres humanos constituyen el centro de las preocupaciones relacionadas con el desarrollo sostenible. Tienen derecho a una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza. La misma declaración, en su cuarto principio enuncia que a fin de alcanzar el desarrollo sostenible, la protección del medio ambiente deberá constituir parte integrante del proceso de desarrollo y no podrá considerarse en forma aislada.

Este capítulo está dedicado al problema del uso eficiente del agua y a sus soluciones tecnológicas, pero debe mantenerse en una correcta perspectiva, es decir teniendo en mente que es un medio necesario y uno de los más eficaces, para alcanzar el desarrollo.

CAMBIOS EN LA OFERTA Y LA DEMANDA

La escasez de agua a que se ha venido haciendo referencia es ocasionada básicamente por cambios en la oferta y la demanda del recurso.

Si bien no pueden caracterizarse a mayor detalle las causas de estos cambios, en general tienen sus orígenes principales en las siguientes.

Factores que aumentan la demanda

Incremento directo de la demanda

El crecimiento de la población y de su bienestar ha aumentado el consumo de agua en alrededor de 500 km³ por año a alrededor de 4500 hacia 1990 (Biswas, 1992).

La población mundial ha crecido en este siglo de alrededor de 1500 millones hacia el año 1900, a más de 5000 millones en la actualidad. De mantenerse las tasas actuales de crecimiento, éste número continuará aumentando, duplicándose la población cada vez con mayor rapidez.

Debido a que no se esperan disminuciones notables en las tasas de natalidad en los próximos años, son de esperarse demandas crecientes de agua para la producción de alimentos en todo el mundo, pero especialmente en los países pobres, que registran las mayores tasas de crecimiento poblacional.

Mayor competencia por el recurso

A principios de siglo, el consumo de agua para la irrigación era de alrededor de 90% del total de agua extraída de las fuentes de captación. Con el incremento en los niveles de vida en muchos países, la migración a las ciudades así como por la industrialización, se espera que para fines de siglo el consumo de agua de las ciudades se eleve a cifras de alrededor de 30% del total, aún considerando que las extracciones continúan aumentando.

En los Estados Unidos, por ejemplo, la industria incrementó su consumo diario en 3.5 veces entre 1950 y 1980, mientras que la irrigación aumentó su consumo sólo en 60% en el mismo período (Maddaus, 1987).

La zona metropolitana de la ciudad de México, una de las más grandes del mundo, consume ya alrededor de 62 m³/s. De ellos, el 30% se abastece de agua superficial y el resto de extracciones del acuífero, que se sobreexplota.

Factores que afectan la oferta

Agotamiento de fuentes

La sobreexplotación de numerosos acuíferos, en los que se localiza la mayor cantidad de agua dulce de los continentes (alrededor del 22%, contra el 0.04% en los ríos), los ha llevado a elevados niveles de agotamiento. En algunos de ellos los niveles freáticos han descendido a profundidades que los hacen no explotables económicamente para la agricultura.

Disminución de la capacidad constructiva

Tanto por razones técnicas como financieras, es cada vez más difícil construir nuevas obras.

Las grandes presas prácticamente han dejado de construirse. De manera natural, los ingenieros optaron por construir primero en los sitios menos complicados, y que ofrecían las mejores posibilidades de alcanzar los mayores beneficios, por ello las dificultades técnicas ahora son mayores, y las utilidades de los proyectos tienden a disminuir. Esta situación no se restringe solamente a la construcción de las obras de captación, sino que se refleja también el costo total de la infraestructura de conducción y distribución. Como consecuencia, el costo por hectárea de riego es cada vez mayor.

Deterioro

En muchas regiones, debido a factores diversos, pero principalmente a la pérdida de suelos por salinidad y ensalitramiento y por mal mantenimiento de la infraestructura hidráulica, el área bajo riego (o su productividad) ha disminuido. Hasta ahora esta disminución ha sido compensada -en la contabilidad de área total irrigada- por las nuevas superficies abiertas al riego, pero no se puede sustituir la producción perdida en ellas.

Contaminación

La contaminación ha de ser vista como uno de los mayores consumidores de agua, puesto que una vez contaminada, el agua no puede ser reusada sin tratamiento, lo que naturalmente incrementa su costo.

Desafortunadamente, como hace notar Biswas (1992), los sistemas de monitoreo de calidad del agua son insuficientes y no consideran muchos elementos contaminadores. Así, no se podrá tener en las próximas décadas una idea precisa de la cantidad, extensión y efectos en la agricultura de la contaminación de corrientes y acuíferos.

Cambio Climático

El calentamiento global, que ha atraído la atención de la opinión pública a raíz de las deliberaciones al respecto en Río de Janeiro, consiste en el incremento de la temperatura promedio anual, en algunos grados centígrados, del planeta a nivel global.

Las causas de este calentamiento son de naturaleza física sencilla: los procesos industriales, de generación de energía y transporte y también algunos agrícolas (en particular el cultivo del arroz) producen continuamente algunos gases que retienen las emisiones de onda corta -calor- que normalmente se desprenden de la tierra hacia el espacio. El resultado es un calentamiento general del planeta, que se detendrá hasta alcanzar un nuevo equilibrio. Los gases que producen este efecto son, principalmente el bióxido de carbono, los nitratos, los fluorocarbonados y el metano. Hay suficientes evidencias para demostrar que desde 1880 la temperatura de la tierra se ha incrementado en más de 0.5 °C, y este incremento es cada vez mayor. También hay evidencias de que el nivel promedio del mar se ha incrementado en este lapso de tiempo.

El clima tiene fluctuaciones naturales, y alguien podría suponer que ésta es una fluctuación natural. En contra de esta opinión está el hecho de que la magnitud de este incremento es muy grande y súbito. De hecho, es mayor que el registrado en los últimos 80,000 años.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM), ante la evidencia del calentamiento global, creó en 1988 un Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), que convocó a diferentes expertos en grupos de trabajo, para analizar los posibles efectos de este fenómeno.

Este grupo, utilizando modelos de circulación general (GCM), analizó los cambios en la temperatura bajo diferentes escenarios, conforme a la producción de gases de invernadero. En el escenario A (Business as usual), no se toman acciones importantes para disminuir la emisión actual de gases, mientras que en los escenarios B, C y D se logran reducciones de 50, 80 y 90% en las emisiones de CO₂. No se realizaron cálculos para el caso, muy probable, de que las emisiones de los gases de invernadero aumenten.

Con estos escenarios, el calentamiento global calculando será de entre 0.3 y 0.5 grados por década en los próximos años, lo que es extraordinariamente alto (Houghton, 1991).

De los escenarios antes descritos, el más probable sería el A.

Es muy importante resaltar que los cambios a nivel regional pueden ser mayores que el global. Por ejemplo, para un calentamiento global de 1.8 °C, previsto en el escenario B para el año 2030, en el centro de los Estados Unidos sería de 2 a 4 grados en invierno y de 2 a 3 grados en verano, mientras que en Europa mediterránea, sería de 2 grados en invierno, y de 3 grados en verano.

El cambio en la temperatura media podría tener un “efecto cascada” en la agricultura. El incremento en temperatura alterará de manera no lineal la precipitación -en cantidad y en tiempos y regímenes de ocurrencia, inclusive aumentando en algunos lugares- que a su vez alterará de manera no lineal el escurrimiento y por ello la disponibilidad de agua.

Por lo tanto los principales efectos podrían ser los siguientes:

- Incremento en las necesidades hídricas de los cultivos, con una probable disminución neta de la producción global en algunos países.
- Cambio en el régimen de precipitación:
 - Las lluvias disminuirían en verano, y en algunos sitios aumentarían en invierno.
 - Disminución de la nieve en zonas de alta latitud.
 - Menos escurrimiento, dada la misma lluvia, por efecto de cambios en la humedad del suelo y convección a la atmósfera.
 - Mayor cantidad e intensidad de tormentas, tanto tropicales como de invierno.

Rodríguez Iturbe (1992) ha señalado que hay varios efectos que podrían retroalimentar el cambio Climático, haciendo más severos sus efectos. En particular, los cambios en la humedad del suelo favorecerían una mayor disminución en la precipitación. La disminución en la cobertura vegetal también retroalimentarían el proceso de sequías.

Así, los cambios en la precipitación y humedad del suelo, combinados con incrementos en la temperatura, pueden ocasionar cambios mayores en el escurrimiento. Estos estudios deben proceder a nivel cuenca.

Existen pocos ejemplos de estudios de cambio en la magnitud de la precipitación. Gleick (1987), para la cuenca de Sacramento, Cal., ha estimado que una disminución de la precipitación de 10% combinado con un incremento de 2 grados centígrados, produciría una disminución de 68% en el escurrimiento de verano, y un incremento de 14% en el invierno. Este caso debe animar al desarrollo de estudios regionales más detallados.

Por otra parte, de acuerdo con el Dr. Kerry Emmanuel (1992), existe una clara correlación entre el número de tormentas tropicales y la temperatura media del mar, que se prevé se incrementará. No se puede establecer por ahora una correlación cuantitativa, pero se puede decir que probablemente habrá un mayor número de tormentas tropicales, y que su intensidad será mayor.

PROBLEMATICA EN SISTEMAS DE RIEGO

En conjunto, los nuevos sistemas ya no podrán aumentar notablemente, de hecho desde hace dos décadas el número de nuevas obras de irrigación ha aumentado a una tasa muy reducida, de crecimiento poblacional, mientras que en las décadas de los sesentas y setentas aumentó alrededor del 3 % .

México, que es un país semiárido y considerado de nivel medio en lo económico, es un buen ejemplo de estas variaciones en la construcción de obras de irrigación y cambios en la oferta, que como hace notar Postel (1989), marcan una clara disminución en el crecimiento de las tasas de crecimiento de la superficie bajo riego.

De acuerdo con análisis realizados por Cervantes *et al.* (1989), en los que se consideró 52 cultivos que cubren del 94% al 98% de la superficie cosechada, de 1925 a 1988 las tasa de rendimiento y superficie crecieron en 1.64% y 2.32% respectivamente. Es decir que la superficie cosechada se incrementó 3.3 veces y el rendimiento mejoró 2.2 veces, como puede verse en la Tabla 1.

Tabla 1
Dinámica de la producción en México (1925-1988), 52 cultivos (Cervantes 1989).

AÑO	PRECIO	INDICES				VALOR TOTAL 10.6%	SUPERFICIE TOTAL (Ha)
		REND.	SUPERF.	COM P.	VALOR		
1925	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	419.7	5220174
1926	0.89	1.04	1.08	1.03	1.04	434.5	5695297
1927	0.91	1.01	1.08	1.07	1.09	457.9	5642593
1928	0.94	1.04	1.07	1.11	1.12	470.0	5561519
1929	0.90	0.93	0.98	1.16	0.99	414.5	5112334
1930	0.66	0.88	0.99	1.11	0.88	368.4	5175755
1931	0.73	1.06	1.08	1.07	0.81	341.6	5614944
1932	0.72	0.98	0.99	1.07	0.76	317.0	5149632
1933	0.79	1.04	1.00	1.12	0.84	353.6	5242921
1934	0.84	0.97	0.95	1.15	0.85	356.7	4972762
1935	0.85	0.98	0.96	1.22	0.97	408.2	5037325
1936	0.98	0.99	0.97	1.32	1.24	521.6	5070464
1937	1.18	0.92	0.99	1.30	1.42	594.1	5205135
1938	1.21	0.95	1.02	1.26	1.49	623.5	5330114
1939	1.24	1.01	1.08	1.25	1.68	706.9	5635102
1940	1.20	0.94	1.11	1.24	1.55	649.9	5788436
1941	1.31	1.01	1.18	1.26	1.97	825.4	6161138
1942	1.53	1.05	1.28	1.26	2.57	1079.2	6655650
1943	2.04	1.00	1.13	1.38	3.21	1345.6	5911353
1944	2.51	1.06	1.20	1.34	4.28	1796.8	6262005
1945	2.89	1.00	1.20	1.38	4.81	2020.0	6273290
1946	3.40	1.04	1.17	1.40	5.80	2435.3	6090861
1947	3.60	1.08	1.24	1.39	6.70	2813.1	6473728
1948	3.80	1.11	1.33	1.40	7.87	3303.7	6966818
1949	4.03	1.16	1.41	1.45	9.54	4003.4	7365078
1950	4.94	1.12	1.61	1.47	13.04	5474.2	8393803
1951	5.30	1.10	1.66	1.51	14.60	6125.6	8678020
1952	5.24	1.11	1.59	1.52	14.04	5890.5	8304667
1953	5.51	1.17	1.73	1.46	16.25	6820.5	9047217
1954	6.15	1.29	1.89	1.45	21.70	9107.4	9853426
1955	6.44	1.35	1.98	1.49	25.56	10727.6	10321160
1956	7.04	1.34	2.02	1.43	27.22	11424.7	10558980
1957	7.77	1.37	2.01	1.52	32.63	13694.4	10502840
1958	7.38	1.40	2.28	1.54	36.16	15176.5	11904290
1959	7.43	1.37	2.27	1.50	34.57	14509.0	11823740
1960	7.37	1.430	2.1300	1.68	37.670	15809.9	11121690
1961	7.78	1.51	2.32	1.61	43.85	18403.5	12092980
1962	7.93	1.57	2.33	1.65	48.22	20237.1	12181370
1963	8.28	1.57	2.51	1.68	54.65	22935.4	13102420
1964	8.43	1.82	2.63	1.57	63.44	26624.7	13749720
1965	8.22	1.75	2.78	1.71	68.32	28671.1	14517390
1966	7.17	1.70	2.96	1.94	70.16	29445.1	14377500
1967	7.02	1.76	2.81	2.04	70.72	29677.9	14647090
1968	6.70	1.80	2.84	2.18	74.74	31367.6	14826410
1969	6.23	1.77	2.70	2.37	70.66	29653.4	14118780

1971	6.59	1.73	2.90	2.50	82.60	34664.7	15147260
1972	6.81	1.65	2.84	2.72	87.08	36542.8	14835590
1973	7.92	1.74	2.96	2.81	114.15	47905.8	15425740
1974	9.75	1.80	2.76	2.97	144.10	60475.4	14402780
1975	10.40	1.73	2.85	3.28	168.60	70797.3	14874920
1976	14.41	1.84	2.67	2.87	203.66	85470.9	13954730
1977	16.0	1.74	2.99	3.23	285.69	119894.9	15625590
1978	20.49	1.83	2.94	3.24	355.83	149330.7	15331680
1979	21.85	1.76	2.54	3.90	380.63	159739.4	13236930
1980	30.46	1.84	2.87	3.34	538.21	225868.5	15006270
1981	26.23	1.93	3.19	3.38	754.83	316778.5	16688550
1982	54.04	1.95	2.63	3.52	973.97	408746.2	13731950
1983	117.34	1.78	3.11	3.34	2175.61	913035.6	16260770
1984	195.96	1.92	3.02	3.35	3812.41	1599949.0	15753540
1985	293.61	2.15	3.30	3.11	6477.90	2118572.0	17231120
1986	511.27	2.25	2.88	2.68	8608.02	3612513.0	15039321
1987	1208.82	1.87	3.25	3.37	223883.35	10027290.0	16972874
1988	2543.11	1.91	3.16	2.74	40598.11	17037740.0	16515064
Tasas	8.92	1.46	2.32	2.08	15.37		

No obstante, estos incrementos no han sido constantes, sino que se pueden distinguir tres períodos: 1925-1940, 1940-1965 y 1965-actual.

El período 1925-1940 presenta tasas negativas de crecimiento, tanto en superficies cosechadas como en rendimiento. El período de 1940-1965 marca una etapa de crecimiento sostenido, que coincide con la construcción de los grandes sistemas de riego. En este período la superficie cosechada se incrementa en 2.5 veces y los rendimientos en un 100%.

En el período de 1966 a 1988 se observan altibajos. Así, aunque continúa la tendencia al crecimiento en las tasas de rendimiento y superficie cosechada, el ritmo es muy lento y menor que las tasas de crecimiento demográfico. Los altibajos son de tal magnitud que, de hecho, las superficies cosechadas en 1986 y 1988 fueron inferiores a las de 1965 y 1966.

Por lo que hace a los sistemas de riego de México, desde 1947 hasta 1988, han cuadruplicado su rendimiento, lo que aunado a los incrementos de superficie bajo riego, ha hecho que en este período se tenga un crecimiento en la producción del 6.2% anual.

Actualmente, la superficie regable asciende a alrededor de 5.4 millones de hectáreas, 3.3 millones en grandes distritos de riego y 2.1 millones en pequeñas unidades de riego.

A nivel mundial, estas tendencias son muy similares, como se desprende de la información de FAO (1990) y se observa en la Figura 1. En América Latina, después de una tasa de crecimiento de la superficie de riego superior al 3% en 1972, se tienen valores inferiores al 1.5%. El promedio en los países en desarrollo es también inferior al 1.5%, y sólo se observa una tendencia creciente en el caso de África.

Los sistemas de riego de México constituyen aproximadamente el 30% del área, y contribuyen con el 55% de la producción agrícola nacional.

Estas cifras no son muy distintas a las que se registran a nivel mundial, en el ICID se estima que en el mundo el área cultivada con irrigación es el 15% del total, y se produce en ella el 40% de los alimentos del mundo (Danez-Bornoz, 1981).

Casi la totalidad de la superficie irrigada en México, alrededor del 96%, como ocurre en la mayoría de los países en desarrollo, se riega por sistemas de riego por gravedad, lo que no favorece el uso eficiente del agua.

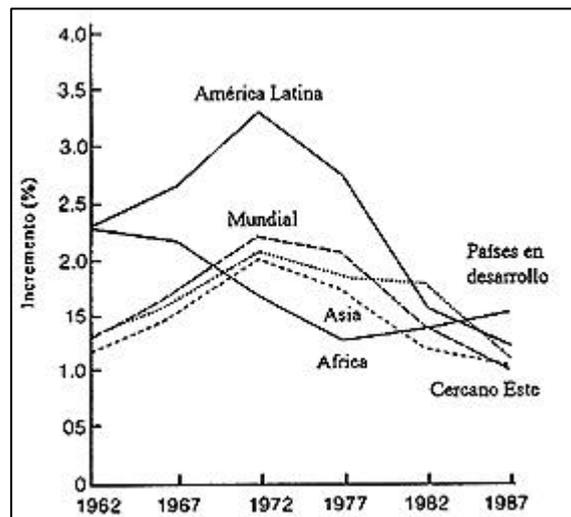


Figura 1
Tasas de crecimiento de superficie bajo riego (FAO, 1990)

Las causas de la baja eficiencia en los sistemas de riego por gravedad pueden ser muy diversas. No obstante, Palacios (1990), realizando mediciones en algunos de los sistemas de riego más importantes de México, concluyó que los principales orígenes son los siguientes.

La eficiencia en la conducción, es decir entre los almacenamientos y el sistema de distribución a nivel parcela, oscila alrededor del 60%. Se ha identificado que las principales causas de la pérdida son:

- a. Evaporación en canales y ríos
- b. Infiltración en conducciones
- c. Fugas en estructuras en mal estado
- d. Desperdicios por manejo incorrecto

Del total de las pérdidas por conducción antes anotadas, se estima que la evaporación contribuye con el 5%, mientras que las fugas, infiltración y manejo son responsables del 30, 30 y 35% del total, respectivamente.

La eficiencia en la aplicación del agua de riego a nivel parcelario es muy variable. Refiriéndose siempre a sistemas por gravedad, se estima que oscila entre un 75% en los distritos de riego más tecnificados, hasta apenas 35% en otros.

Estos niveles de eficiencia son típicos a nivel mundial. De acuerdo con datos recabados por Postel (1986) la eficiencia de los sistemas de irrigación en el mundo tiene un promedio de 37%, y sólo unos pocos alcanzan niveles de alrededor del 50%, si bien en teoría pueden lograrse valores cercanos a 90%.

No obstante, es un hecho que comparado con los sistemas de riego presurizado, es mucho más difícil lograr el uso eficiente del agua en sistemas de riego por gravedad, aunque teóricamente puedan alcanzarse valores similares.

LINEAS DE DESARROLLO TECNOLÓGICO

Criterios de selección

Considerando la problemática planteada en las páginas anteriores, se procedió a realizar un análisis del estado del arte de la tecnología, específicamente de las líneas de investigación y desarrollo tecnológico que parecen más prometedoras, conforme a reconocidos especialistas y la limitada experiencia del autor.

Explícitamente o no, cualquier proceso de selección supone reglas, al menos genéricas. Este caso no es la excepción, así, aunque se buscó definir criterios útiles y generales que por supuesto no son los mejores, a fin de no excluir posibles soluciones futuras, las reglas son restrictivas, y acortan el conjunto de posibilidades.

Los criterios utilizados fueron los siguientes:

- a. La tecnología producida debe ser, en la medida en que esto pueda predecirse, aplicable a países en desarrollo.
- b. Las líneas de desarrollo preferibles son aquellas que muestran posibilidades de producir el mayor impacto (beneficiar al mayor número de personas) mediante el mejoramiento de la eficiencia en el uso del agua de riego.

c. La investigación básica debe realizarse sólo si está asociada a problemas de importancias, detectados en otras líneas de desarrollo, elegidas con los criterios (a) o (b).

Las líneas de desarrollo tecnológico identificadas se han agrupado en los rubros de mejoramiento en la operación, mejoramiento en la captación y conducción, mejoramiento en técnicas de riego parcelario e investigación básica.

Mejoramiento en la operación

Elaboración de programas de cultivo - Una de las áreas más prometedoras para incrementar la eficiencia del uso del agua para riego, es la aplicación de técnicas de optimización en la asignación del agua (Wu, 1972). Uno de los enfoques que parecen tener mayores probabilidades de éxito, es la aplicación de métodos que permitan tomar en cuenta la respuesta de los cultivos, en cada período vegetativo, a la cantidad del agua aplicada.

Un método con el que podría iniciarse el estudio de este campo, es el desarrollado por Holzapfel *et al.* (1986), que ya ha sido aplicado en Chile y los Estados Unidos. Otra ventaja de este método es que ha sido diseñado específicamente para sistemas de riego por gravedad, que son los más abundantes en países en desarrollo.

Uso óptimo de agua salina y dulce - En algunos sitios, existe una cierta cantidad de agua disponible con contenidos elevados de sales. En general, esta agua no se utiliza para riego, pero las investigaciones recientes indican (Dinar *et al.*, 1986), que ambos tipos de agua pueden utilizarse de manera combinada, optimizando los beneficios.

Por otra parte, el utilizar agua con contenidos elevados de salinidad permite eventualmente incrementar el área cultivada.

Este tipo de sistema de riego no es posible para cualquier cultivo, sino solo para aquellos que ofrecen una cierta resistencia a la salinidad. En estos casos, conocida la función de respuesta del cultivo a la salinidad, es posible maximizar la producción. Algunos de estos cultivos, como la salicornia, pueden sustituir parcialmente a algunos forrajes.

Monitoreo de condiciones del suelo y clima - La determinación de las condiciones del suelo durante el desarrollo de un cultivo puede permitir el proporcionarle, con una alta precisión la cantidad requerida en el momento oportuno. Una forma de lograrlo es con la instalación de dispositivos de medición, con registro continuo.

Este tipo de sistemas, sin embargo, por su alto costo sólo puede utilizarse en cultivos con altos rendimientos y en áreas restringidas. Conviene realizar investigación para desarrollar métodos más económicos de medición.

Un método prometedor consiste en la instrumentación con dispositivos mucho menos caros (tensiómetros principalmente) de las parcelas. Los agricultores son los encargados de recabar los datos de tensión de humedad en el suelo y de llevarlos a la unidad central del sistema de riego. Con esta información, los encargados de la operación del sistema pueden decidir con mayor objetividad, cuándo conviene regar.

Pronóstico de sequías - Las sequías son en los países semiáridos, por mucho, el desastre natural más costoso para la agricultura. En este sentido, es de suma importancia desarrollar métodos de pronósticos de estos eventos.

Los métodos deberán utilizar el tipo de datos disponibles en el país, y producir un pronóstico cuantitativo, razonablemente confiable de la magnitud de una sequía.

Un problema de la mayor relevancia, no sólo para un adecuado control del sistema de irrigación, sino que sea factible cualquier medida de incremento en la eficiencia (ASCE, 1974), es la obtención de datos suficientes y fidedignos. En este sentido, destacan dos importantes medidas: La medición del agua de riego y la de la radiación neta. De éstas, se pueden derivar otras líneas de investigación y desarrollo.

Protección de tierras agrícolas - La protección de las tierras agrícolas ante inundaciones es otra prioridad en países en los que el régimen de las lluvias está dominado por grandes lluvias de verano, de origen ciclónico o monzónico. El desarrollo de métodos de pronóstico y diseño de estructuras de protección es por tanto una línea de investigación prioritaria.

En esta línea con es necesario la aplicación de modelos matemáticos de flujo bidimensional a superficie libre. Los objetivos de estos estudios serían:

- a.1. La simulación del flujo a superficie libre en llanuras con diversas condiciones de frontera para analizar y diseñar opciones de obras para el drenaje.
- a.2. Investigar los procesos fluviales que intervienen en el diseño y conservación de obras marginales de protección contra inundaciones.
- a.3. Desarrollar, con la herramienta anterior, criterios y normas de diseño de obras de protección.

Estructuras de aforo - Un problema de la mayor relevancia, no sólo para un adecuado control del sistema de irrigación, sino para que sea factible cualquier medida de incremento en la eficiencia (ASCE, 1974), es la obtención de datos suficientes y fidedignos. En este sentido, destaca una importante medida: La medición del agua de riego. La implementación y/o desarrollo de estructuras de aforo para sistemas de riego por gravedad, que sean económicas y de fácil diseño y uso, es un problema de la mayor relevancia. Sin la medición del agua distribuida, no es posible ninguna mejora en la eficiencia del sistema.

Esta actividad puede iniciarse con la aplicación de métodos de diseño de estructuras que no requieren calibración en campo, como los “Aforadores de garganta larga (Martínez-Austria & Castillo, 1991)”. Estas estructuras de aforo pueden automatizarse con dispositivos electrónicos (Espinosa y Contreras, 1991).

Mejoramiento en la captación y en la conducción.

Mejoramiento en la captación - Una línea de investigación que podría brindar resultados, con bajo costo, en la reducción de la evaporación en embalses (ASCE, 1974), es la introducción de material flotante de color blanco. Al parecer, al aumentar el albedo, se produce una disminución de la temperatura en el cuerpo de agua, con lo que se consigue una correspondiente disminución en el evaporación.

Algunos métodos de disminución de la evaporación en embalses están disponibles comercialmente, pero no se tienen suficientes datos sobre su funcionamiento en grandes cuerpos de agua. Este tipo de medidas, por su sencillez, pueden ofrecer una rápida aplicación, una vez realizadas investigaciones sobre sus efectos reales.

Disminución de infiltración en la conducción - Las pérdidas por infiltración en canales no revestidos son, sin duda la principal causa, desde el punto de vista hidráulico, de pérdidas de agua en la conducción. La solución más evidente, que sin embargo es costosa, es la de revestir los canales con mampostería concreto.

Una línea de investigación prometedora es el diseño y prueba de “selladores”, tales como carbonato de sodio, en canales no revestidos. Sobre el particular no se han hecho suficientes estudios, pero por su bajo costo podrían representar una buena alternativa.

Optimización en el manejo de canales - Como se mostró en el subcapítulo anterior, el manejo inadecuado del agua en conducción y distribución es una de las principales causas de pérdidas.

En redes de distribución muy extendidas, o con canales muy largos, deberán definirse políticas óptimas de operación, que minimicen las pérdidas.

Este problema está asociado con el de control de flujo en la red de canales, por lo que deben atacarse de manera simultánea y coordinada.

El desarrollo de algoritmos de optimización en la operación de redes de canales es una línea de investigación de gran interés, que sin embargo se complica por la existencia de diferentes cultivos, con diferentes requerimientos de agua, en zonas alimentadas por un canal.

Control automatizado de canales - Este es un campo de investigación en el que se ha avanzado significativamente desde hace más de una década. Y en 1974, la FAO publicó un texto en el que se recomiendan algunos métodos de control automatizado.

En el control del flujo en canales se ha avanzado especialmente en el diseño de compuertas de control de niveles y gastos.

No obstante, existen dos campos de investigación en los que hace falta mayor estudio:

- Compartimiento del sistema ante fallas de alguno de sus elementos.
- Adaptación de estos métodos de control en sistemas de canales ya existentes.

En particular, esta última línea de investigación es de gran importancia. El encontrar medios y métodos que hagan más económica la implantación de mejoras en el funcionamiento de redes de canales ya existentes, que fueron diseñadas con otros criterios, puede resultar un problema complejo.

Se han hecho en este campo numerosos estudios y aplicaciones a los canales principales de los mayores sistemas de riego, pero no puede decirse que el problema está resuelto. Se requiere métodos más económicos y seguros, y aplicables a canales ya construidos (se recomienda ver Nayan *et al.* (1991)).

Mejoramiento de las técnicas de riego

Definición de condiciones de aplicación de sistemas de riego - La elección apropiada de un sistema de riego, acorde con las condiciones de suelo, disponibilidad de agua, calidad, clima, etc.; es uno de los problemas de mayor interés, especialmente en regiones semiáridas (Saffat (1980), Norum (1980)). No obstante, la información (y la experiencia) sobre los principales métodos y sus resultados en diversas regiones, se encuentra dispersa. De este modo, la selección no se guía por criterios enteramente objetivos. Una actividad de transferencia de tecnología, de gran utilidad, consistiría en reunir esta información en un texto capaz de permitir a los encargados de la selección contar con criterios objetivos.

Parece obvio, por ejemplo, para muchos agricultores y tomadores de decisiones, que los sistemas de riego presurizados (los diferentes sistemas de riego por aspersión o goteo) mejoran automáticamente la eficiencia del uso del agua, disminuyendo el consumo. Además de que existen efectos secundarios que deben ser considerados, se ha demostrado (Caswell (1989)) que puede darse el caso de que un agricultor demande más agua por hectárea con un sistema de riego presurizado que con uno de riego superficial.

Riego intermitente - Esta es una nueva técnica de riego en parcela, potencialmente capaz de modificar drásticamente las prácticas actuales de riego por gravedad, incrementando la eficiencia, tanto en lo que se refiere a disminuir las pérdidas en drenaje al final de la parcela, como por aumentar la uniformidad en su aplicación, limitando pérdidas por percolación profunda.

A esta nueva técnica debe prestársele especial atención, por lo que se comentará con mayor detalle.

El riego intermitente en sistemas de surcos o bordos, consiste esencialmente en sustituir la aplicación continua de agua por ciclos de riego y no riego alternados. Durante la etapa en que se suspende el riego se producen modificaciones en las características de infiltración del suelo, de tal manera que en las siguientes etapas de riego se aumenta la velocidad de conducción, aumentando la uniformidad, mejorando los tiempos de oportunidad y por tanto disminuyendo pérdidas al final de la parcela.

La técnica de riego intermitente fue propuesta formalmente por Stringham y Keller apenas en 1979 y desde entonces, por su importancia, se ha iniciado un abundante trabajo de investigación en diferentes líneas. Se ha realizado estudios para modelar el avance del frente de agua (Coolidge *et al.* (1982)), Bishop *et al.* (1981) y para describir el proceso de infiltración (Samani *et al.* (1985)), como para su aplicación práctica y diseño (Karmeli, 1975).

Se ha encontrado que, en muy variadas condiciones, el método de riego intermitente, reduce pérdidas y aumenta la eficiencia de aplicación. Por ejemplo, se han establecido mejoras significativas para longitudes de surcos muy cortas (100 m) o muy largas (1000 m) o más (ver Stringham & Keller (1979), Coolidge *et al.* (1982)).

Uno de los aspectos más relevantes a adoptar como una línea de investigación prioritaria, es el diseño de dispositivos de riego intermitente automáticos para sistemas por gravedad. Actualmente existen comercialmente válvulas eléctricas que operan con energía solar, sin embargo por su costo están fuera del alcance de muchos agricultores.

Una alternativa que se ha demostrado viable, es el uso de dispositivos fluidicos, es decir dispositivos sencillos que controlen el agua sin medios eléctricos o electrónicos (se sugiere ver Martínez Austria & Aldama (1991)).

Irrigación con déficit - En situaciones en las que existe escasez de agua, se puede elaborar un programa de riego tal que una parte de la parcela sea plenamente regada, otra regada con déficit, y finalmente una tercera parte que solo disponga de la precipitación y los excedentes de las dos anteriores.

Visto a nivel parcela, tal sistema producirá menor, por supuesto, que si fuera completamente regado, sin embargo, ante la escasez del recurso, la producción global del sistema puede verse aumentada, al no producirse pérdidas por salidas a los drenajes.

Para establecer las posibilidades de este tipo de sistema debe realizarse investigación de campo, cultivando parcelas durante varios periodos de siembra-cosecha. Existen ya investigaciones antecedentes al respecto (English & Nuss 1982; Stewart *et al.* 1981), que no han sido suficientemente estudiadas. Este concepto por otra parte, puede extenderse a la operación normal de sistemas en zonas áridas, y no sólo bajo sequías.

Reuso del agua - Como se estableció en la introducción, cada vez el consumo de agua en las ciudades será mayor. El agua utilizada domésticamente, debe ser reutilizada, si se quiere hacer realmente un uso eficiente.

De esta manera, los sistemas de reuso son de la mayor prioridad en desarrollo, adaptación y transferencia de tecnología: tanto en sistemas de tratamiento, como en métodos de aplicación, limitaciones y efectos en el suelo, en los cultivos y, por supuesto, en la salud humana.

El reuso del agua puede hacerse también con el agua de los sistemas de riego. Por ejemplo, con el fin de lograr iguales tiempos de oportunidad en los surcos bajo riego, y lograr así un mejor perfil de humedad en el suelo, una parte del agua aplicada se vierte a los drenes, la cual podría ser reutilizada. Es necesario, sin embargo, realizar una investigación para establecer metodologías de diseño de tales sistemas que efectuando un balance en volumen correcto, garanticen su factibilidad económica (v. g. Yigatew & Fangmeier (1985)).

Sistemas LEPA - Con estas siglas se identifica un nuevo sistema de aplicación precisa con baja energía (Low Energy Precision Application), desarrollado por Lyle y Bordovsky (1981), para utilizarse para mejorar la eficiencia en sistemas por aspersión. El método rápidamente que podía efectivamente mejorar la eficiencia en sistemas por aspersión aunque los costos de inversión fueran altos (3000 a 8000 dls. por línea de 400 m.).

Considerando, por otra parte, que el costo de energía es a su vez alto, los sistemas LEPA ofrecen una de las mejores alternativas para los futuros sistemas presurizados. Recientemente Guy & León (1991), han reportado eficiencias de aplicación de entre el 95 y 98% en sistemas de Pivote Central.

INVESTIGACION BASICA

Modelos de balance hídrico - La decisión de cuándo y cuánto regar, fundamental para un incremento en la eficiencia de uso del agua, depende del conocimiento del estado de humedad del suelo, en cada etapa del desarrollo vegetativo de los cultivos. El monitoreo de esta variable es difícil y costoso, por lo que puede ser sustituido, como una aproximación, por un modelo de balance de la humedad del suelo.

Este tipo de modelos existen desde hace tiempo, sin embargo pueden ser mejorados para que puedan incluirse los avances recientes en el conocimiento, así como efectos que antes no era posible incluir.

Contar con un modelo de balance de la humedad del suelo, con aplicación práctica y razonable precisión, ayudaría a la mejora en la operación de los sistemas de riego.

Cálculo del flujo en surco - El movimiento del flujo en surcos depende de numerosas variables, de tal forma que no pueden obtenerse fórmulas sencillas que, al mismo tiempo, sean suficientemente exactas.

No obstante, para el correcto diseño del riego parcelario en sistemas por gravedad, es necesario determinar el comportamiento del flujo, lo cual puede hacerse resolviendo numéricamente las ecuaciones que rigen el fenómeno (i. e. Elliot & Walker (1982), Rayes & Wallender 1985), Izadi & Wallender 1985).

Se considera importante obtener modelos y algoritmos en computadora de simulación del flujo en surcos, en especial para el riego intermitente.

Modelación del flujo intermitente en surcos - Buena parte del éxito en la reducción de pérdidas y aumento en la uniformidad, que posee el método del riego intermitente, se deben a la variación brusca del coeficiente de infiltración, que se produce durante la etapa de no riego. Hasta ahora, no se conocen con precisión las causas de este fenómeno, aunque se puede deber a efectos de tensión superficial o lavado de materiales finos.

Aunque se realizan esfuerzos en diversas instituciones, no se cuenta con un modelo numérico de simulación del flujo en surcos bajo riego intermitente. El disponer de tal modelo, permitiría prever las condiciones óptimas de empleo del método, por lo que se le considera una línea de investigación prioritaria.

Efectos ambientales del uso eficiente - Se prevé que el aumento en la eficiencia puede resultar en importantes efectos, algunos beneficios (Dybala (1991) y otros no, sobre la calidad del agua (se recomienda ver el reporte del "Task committee on water quality problems resulting from increasing irrigation efficiency" de la ASCE, 1985).

Los problemas potenciales incluyen una excesiva acumulación de sales en el suelo y degradación de la calidad de las aguas subterráneas.

Es necesario, para resolver estos potenciales problemas.

a. Desarrollar modelos para predecir requerimientos de lavado de suelos.

b. Modelos de simulación del flujo de contaminantes a los acuíferos. Se espera que, al ser reducido este efecto, se obtenga un resultado benéfico.

Para contar con modelos apropiados de este tipo será necesario promover la investigación fundamental en física del suelo. En este aspecto, se recomienda leer el trabajo de Clothier (1989).

REFERENCIAS

- ASCE, **Report of the Task Committee**, Task Committee on water quality problems resulting from increasing irrigation efficiency, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 3, 1985.
- ASCE, "Water management through irrigation and drainage: progress, problems, and opportunities" Committee on Research of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, IR2, 1974.
- BISHOP, A. A.; WALKER, W. R.; ALLEN, N. L.; POOLE, G. J., "Furrow advance rates under surge flow systems", Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 107, No. IR3, 1981.
- BISWAS, A. K., "Water for sustainable development in the 21st century: a global perspective" Water International, International Water Resources Association, Vol. 16, No. 4, Urbana, Ill., Estados Unidos, 1991.
- BISWAS, A. K., "Sustainable Water Development: a Global Perspective" Water International, Vol. 17, No. 2., International Water Resources Association, Urbana, Ill., Estados Unidos, 1992.
- CASWELL, M. F., "The adoption of low-volume irrigation technologies as a water conservation tool" Water International, Vol. 14, No. 1, International Water Resources Association, 1989.
- CERVANTES, M. E.; ISLAS, R. M. A.; DUARTE, A. J. L., "Análisis de la producción agrícola nacional" (Analysis of national agricultural production) Ingeniería Hidráulica en México, 1989.
- CLOTHIER, B. E., "Research Imperatives for Irrigation Science" Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 115, No. 3, ASCE, 1989.
- COOLIDGE, P. S.; WALKER, W. R.; BISHOP, A. A., "Advance and runoff-surge flow furrow irrigation" Journal of Irrigation and Drainage Division, Vol. 108, No. IR1, ASCE, 1982.

DANES-BORNOZ, R., "Reflections of the charge of some priority axes of hydraulic research in the field of land and water management" Lecture of the 10th IAHR Congress, India, February 1981.

DINAR, A.; LETEY, J.; VAUX, JR., H. R., "Optimal ratios of saline and nonsaline irrigation waters for crop production" *Soil Science Society of America*, Vol. 50, 1986, pp. 440-443.

DYBALLA, C., "How conserving water can help communities meet environmental objectives" *Proceedings of the International Seminar on Efficient Water Use*, Mexico, October 21-25, 1991.

ECLAC, "El desarrollo sustentable: transformación productiva, equidad y medio ambiente" (Sustainable development: productive transformation, equity and environment), Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC), U. N., Santiago de Chile, 1991.

ELLIOT, R. L.; WALKER, W. R., "Zero-inertia modeling of furrow irrigation advance" *Journal of Irrigation and Drainage Division*, Vol. 108, No. IR3, ASCE, 1982.

ENGLISH, M. J.; NUSS, G. S., "Designing for deficit irrigation" *Journal of Irrigation and Drainage Division*, Vol. 108, No. IR3, ASCE, 1982.

ESPINOSA, O. A.; CONTRERAS, N., "Totalizador volumétrico para canales" (Volumetric totalizer for channels) *Proceedings of the International Seminar on Efficient Water Use*, Mexico, October 21-25, 1991.

FAO, "An International Action Programme on Water and Sustainable Agricultural Development" FAO, Rome, 1990.

GLEICK, P., "Regional hydrologic consequences of increases in atmospheric CO₂ and other trace gases" *Climatic Change*, No. 10, 1981, pp-137-161.

HOLZAPFEL, E. A.; MARIO, M. A.; CH&AACUTE;VEZ-MORALES, J., "Surface irrigation optimization models" *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, No. 1, ASCE, 1986.

HOUGHTON, J. T., "Scientific assessment of climate change" Summary of the IPCC working group I report, "Climate Change: Science, Impacts and Policy" *Proceedings of the Second World Climate Conference*, Cambridge University Press, 1991.

IZADI, B.; WALLENDER, W. W., "Furrow hydraulic characteristics and infiltration" *Transactions ASCE*, 28 (6), 1985.

IWRA, **Proceedings of the International Seminar on Efficient Water Use**, Mexico, October 21-25, 1991, 938 pp.

JENSEN, M. E., "Arid lands - Impending water population crises" **Proceedings of the International Symposium on the Hydraulics/Hydrology of Arid Lands**, ASCE, San Diego, California, July 30-August 2, 1990.

KARMELI, D.; PERI, G., "Pulse irrigation - design for operating sets" *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, Vol. 103, IR1, ASCE, 1975.

KERRY, E., "Severe Storms", Paper presented at the Symposium **The world at risk: natural hazards and climate changes**, Massachusetts Institute of Technology, Boston, Mass., U.S.A., January 14-16, 1992.

LYLE, W. M.; BORDOVSKY, J. P., "Low energy precision application (LEPA) irrigation system", *Transactions ASCE* 24 (5), 1981.

LYLE, W. M.; BORDOVSKY, J. P., "LEPA irrigation system evaluation" *Transactions ASCE*, 1983.

MADDAUS, W. O., **Water Conservation**, American Water Works Association, Denver, Co., Estados Unidos, 93 pp.

MART&IACUTE;NEZ-AUSTRIA, P.; CASTILLO, J., "Diseño por computadora de aforadores de garganta larga" (Computer design of long-throat water gauges) **Proceedings of the International Seminar on Efficient Water Use**, Mexico, October 21-25, 1991.

MART&IACUTE;NEZ-AUSTRIA, P.; ALDAMA, A. A., "A simple fluidic device for surge flow irrigation", **XXIV Congress of the International Association for Hydraulic Research**, Madrid, Spain, 9-13 September.

NAYAN, S.; PANDEY, A. D.; DEBAJYOTI, C., "Feasibility for canal automation to an existing canal -a case study" **Proceedings of the International Seminar of Efficient Water Use**, México, October 21-25, 1991.

NORUM, E. M., "Irrigation System Selection: Secondary Considerations" in **Irrigation and Agricultural Development**, FAO/Pergammon Press, 1980.

PALACIOS V&EACUTE;LEZ, E., "Problemática del uso eficiente del agua en México" (Problems related to efficient water use in Mexico) **Proceedings of the International Workshop on Efficient Water Use in Arid Zones**, Cuernavaca, Mor., Mexico, March 5-9, 1990.

POSTEL, S., "Effective water use for food production" **Water International**, No. 11, 1986.

POSTEL, S., "Water for agriculture: facing the limits" *Worldwatch* paper 93, Worldwatch Institute, Washington, D. C., Estados Unidos, 1989.

RAYES M.; WALLENDER, W. W., "Furrow irrigation simulation time reduction" **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Vol. 111, No. 2, ASCE, 1985.

RODRIGUEZ-GUEZ-ITURBE, I., "Possible impacts of climate change on droughts and desertification" Paper presented at the Symposium **The world at risk: natural hazards and climate changes**, Massachusetts Institute of Technology, Boston, Mass., U.S.A., January 14-16, 1992.

SAFFAF, A. Y., "Selection of appropriate irrigation methods for semi-arid regions" in **Irrigation and Agricultural Development**, FAO/Pergamon Press, 1980.

SAMANI, Z. A.; WALKER, W. R.; WILLARDSON, L. S.; POOLE, G. J., "Infiltration under surge flow irrigation" ASCE, Vol. 28, No. 5, 1985.

SCHILLER, E. J., "Water resources: an emerging crisis" in **Sustainable Water Resources Management in Arid Countries**, Special Issue, Canadian Journal of Development Studies & International Water Resources Association, 1992, pp. 7-12.

STARR, J., "Water security: the missing link in the mideast strategy" Special Issue, Canadian Journal of Development Studies & International Water Resources Association, Canada, 1992.

STEWART, B. A.; DUSEK, D. A.; MUSICK, J. T., "A management system for the conjunctive use of rainfall and limited irrigation of graded furrows" Soil Science Society of America, Vol. 45.

STEWART, J. I.; HAGAN, R. M.; PRUITT, W. O., "Functions to predict optimal irrigation" Journal of Irrigation and Drainage Div., ASCE, IR2, 1974.

STRIGHAM, G. E.; KELLER, J., "Surge flow for automatic irrigation" **Proceedings of the 1979 Irrigation and Drainage Division Specialty Conference**, ASCE, Albuquerque, N. M., Estados Unidos, 1979.

TVED, T., "The struggle for water in the Middle East" Special Issue, Canadian Journal of Development Studies & International Water Resources Association, Canadá, 1992.

UNITED NATIONS, "Rio Declaration on Environment and Development" **United Nations Conference on Environment and Development**, Rio de Janeiro, Brazil, June 3-14, 1992.

WU I-PAI, Tung Liang, "Optimal irrigation quantity and frequency" Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, IR1, 1972.

YIGATEW, M.; FANGMEIER, D. D., "Reuse system design for border irrigation" Journal of the Irrigation and Drainage Engineering Division, Vol. 111, No. 2, ASCE, 1985.
