

Caracterización de las superficies agrícolas y sus volúmenes de irrigación en la cuenca del río San Juan, México

José Návar*
Efraín Rodríguez Téllez**

Recibido: 7 de mayo de 2001
Aceptado en versión final: 5 de marzo de 2002

Resumen. El manejo sustentable de los recursos hidrológicos de la cuenca del río San Juan es prioritario para el desarrollo regional del noreste de México. En este trabajo se cuantificaron las superficies agrícolas con riego y se predijeron los caudales necesarios para irrigar la superficie bajo tres diferentes escenarios de precipitación, como una forma de inventariar la necesidad de agua por el sector agrícola. La superficie agrícola total ascendió a 172 000 ha, los cultivos más comunes fueron el maíz, el sorgo y los cítricos. Los caudales de agua necesarios para irrigar la superficie agrícola se aproximaron a 1 319, 1 688 y 188 mm³ año⁻¹ cuando se presentan precipitaciones con un 50, 20 y 80% de ocurrencia en la cuenca del río San Juan. La agricultura bajo riego contribuye a disminuir el gasto, conllevar una mayor extracción de agua de los ríos para satisfacer los usos consuntivos de los cultivos cuando existen sequías. Se enfatiza la necesidad de implementar prácticas de manejo sustentable de recursos hidrológicos como una alternativa para amortiguar los cambios potenciales en las superficies agrícolas.

Palabras clave: Uso consuntivo, precipitaciones, probabilidades, distribución gamma, noreste de México.

Characterization of agricultural areas and irrigation volumes in the San Juan river basin, Mexico

Abstract. The sustainable management of hydrological resources in the San Juan river basin is top-priority for the regional development of Northeastern Mexico. This research report quantified irrigated agricultural areas, and water volumes required for irrigation were predicted under three rainfall scenarios, as an approach to build an inventory of water requirements by the farming sector. The total agricultural area amounted 172 999 hectares, the commonest crops being corn, sorghum and citric fruits. Water volumes required for irrigation approximated 1 319, 1 688 and 188 mm³ year⁻¹ under probability of rainfall occurrence scenarios of 50, 20 and 80% the San Juan river basin. Irrigation agriculture contributes to reduce expenses, leads to a higher water extraction from rivers to satisfy farming consumption when drought periods occur. The need to implement sustainable hydrological resource management practices is stressed, as an alternative to ameliorate potential changes in agricultural areas.

Key words: Consumption, rainfall, likelihood, gamma distribution, Northeastern Mexico.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso limitante para el desarrollo regional del noreste de México. Aunque la cuenca del río San Juan presenta una problemática compleja en relación con el manejo sustentable de sus recursos hidrológicos, en la que se incluyen problemas entre usuarios, entre usos y entre entidades políticas (SARH-CNA, 1994), no se ha cuantificado en detalle la necesidad existente de agua. Los usos actuales incluyen principalmente los sectores municipal (doméstico, industrial, co-

mercial), agrícola y ambiental.

En la cuenca del río San Juan, donde se ubican dos metrópolis importantes, Saltillo y Monterrey, el sector municipal utiliza actualmente 415 mm³ año⁻¹, cuya población aproximada alcanza 5 millones de habitantes (INEGI, 1999). La población tenderá a incrementar hasta 8.4 millones de habitantes para el año 2045, según tendencias estimadas con información de Conapo (1996); para el 2020, se requerirá un gasto próximo a los 890 mm³ año⁻¹ (Návar, 1999).

*Facultad de Ciencias Forestales, UANL, Km. 145 Carretera Nacional, 67700, Linares, Nuevo León, México.
Email: jnavar@ccr.dsi.uanl.mx

**Consultor Forestal, Durango, México.

La vegetación riparia forma un corredor de alta diversidad biológica y la cuenca del río San Juan posee una longitud de cauces con corrientes perennes o intermitentes de 1 575 km con un área de vegetación riparia de 5 900 ha (Guerra y Nívar, 1999). Esta comunidad vegetal se encuentra en un estado de transición importante por la eliminación de especies consideradas freatofitas y la aparición de xerófitas, resultante probablemente debido a los cambios detectados en los gastos de los ríos. La comunidad vegetal, con una tasa transpirativa promedio de 2 m año^{-1} , necesita aproximadamente de $126 \text{ mm}^3 \text{ año}^{-1}$ para su sobrevivencia (Nívar, 1999), aunque para mantener su dinámica, las condiciones de los gastos se deben restablecer completamente a las condiciones prístinas. La cantidad y calidad de agua indispensable para mantener la dinámica de la vida acuática tampoco se ha determinado cuantitativamente. Existe evidencia de una estrecha relación entre la cantidad y calidad de las aguas del río y la estructura de la diversidad-abundancia de peces (Guerra, 2000; Contreras y Lozano, 1994) y de insectos acuáticos (Guerra, 2000).

La demanda de agua para uso agrícola tampoco se ha cuantificado en detalle en la cuenca en estudio. Existe información para los principales distritos de riego, la cual es variable. Reportes sobre el Bajo San Juan y Las Lajas indican que se utiliza entre $375 \text{ mm}^3 \text{ año}^{-1}$ (SARH, 1981) a $540 \text{ mm}^3 \text{ año}^{-1}$ (ERL, 1991; Nívar, 1999) para el primero y $4.8 \text{ mm}^3 \text{ año}^{-1}$ (CNA, 1997) para el segundo. Sin embargo, existen numerosas parcelas a lo largo de los principales ríos de la cuenca que hacen uso de los caudales presentes. En consecuencia, no se ha determinado cuantitativamente la cantidad de agua utilizada por el sector agrícola en toda la cuenca de este río. Esta información es clave en el inventario de usuarios de agua de la cuenca del río San Juan, como un primer paso en la promoción de las prácticas de sustentabilidad de los recursos hidrológicos.

El gasto en el río de la cuenca es altamente variable en tiempo y en espacio. Períodos secos se han detectado para los años cincuenta, principios de los ochenta y toda la década de los noventa (Nívar, 1999). La presente sequía ha reducido el gasto en el río San Juan, llegando hasta registrar cero en algunos puntos de la cuenca a mediados de 1998. Este período seco, el cual no parece haber terminado (Schmand *et al.*, 1998), ha agudizado los conflictos internos por las aguas del río San Juan. Los almacenamientos de los embalses El Cuchillo y Marte R. Gómez descendieron hasta sus límites más bajos desde sus construcciones. En el distrito 026 o Bajo San Juan el área irrigada se redujo hasta un 20% a principios de los años noventa. Es probable que las sequías futuras, aunadas al incremento en la demanda de agua para uso municipal en la cuenca, podrían comprimir aún más las superficies irrigadas y estresar igualmente las relaciones sociales, económicas y políticas de los usuarios del agua de la cuenca del río San Juan.

Los objetivos de este trabajo son: *i*) determinar la superficie agrícola bajo riego, *ii*) estimar la cantidad de agua necesaria para irrigar esta superficie a través del uso consuntivo de los cultivos, *iii*) determinar escenarios posibles con precipitaciones cambiantes de la cantidad de agua utilizada para riego y *iv*) discutir las potencialidades de implementar manejo sustentable de recursos hidrológicos en la cuenca del río San Juan del nordeste de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del área en estudio

La cuenca del río San Juan se localiza en el nordeste de México (Figura 1). Perteneció a la región hidrológica de los ríos Bravo-Conchos y cubre un área de drenaje de aproximadamente $33\,000 \text{ km}^2$, en los estados de Coahuila (40%), Nuevo León (57%) y Tamaulipas (3%). El sistema hídrico de la cuenca del río San Juan tiene su origen en el arroyo La Chueca, el cual

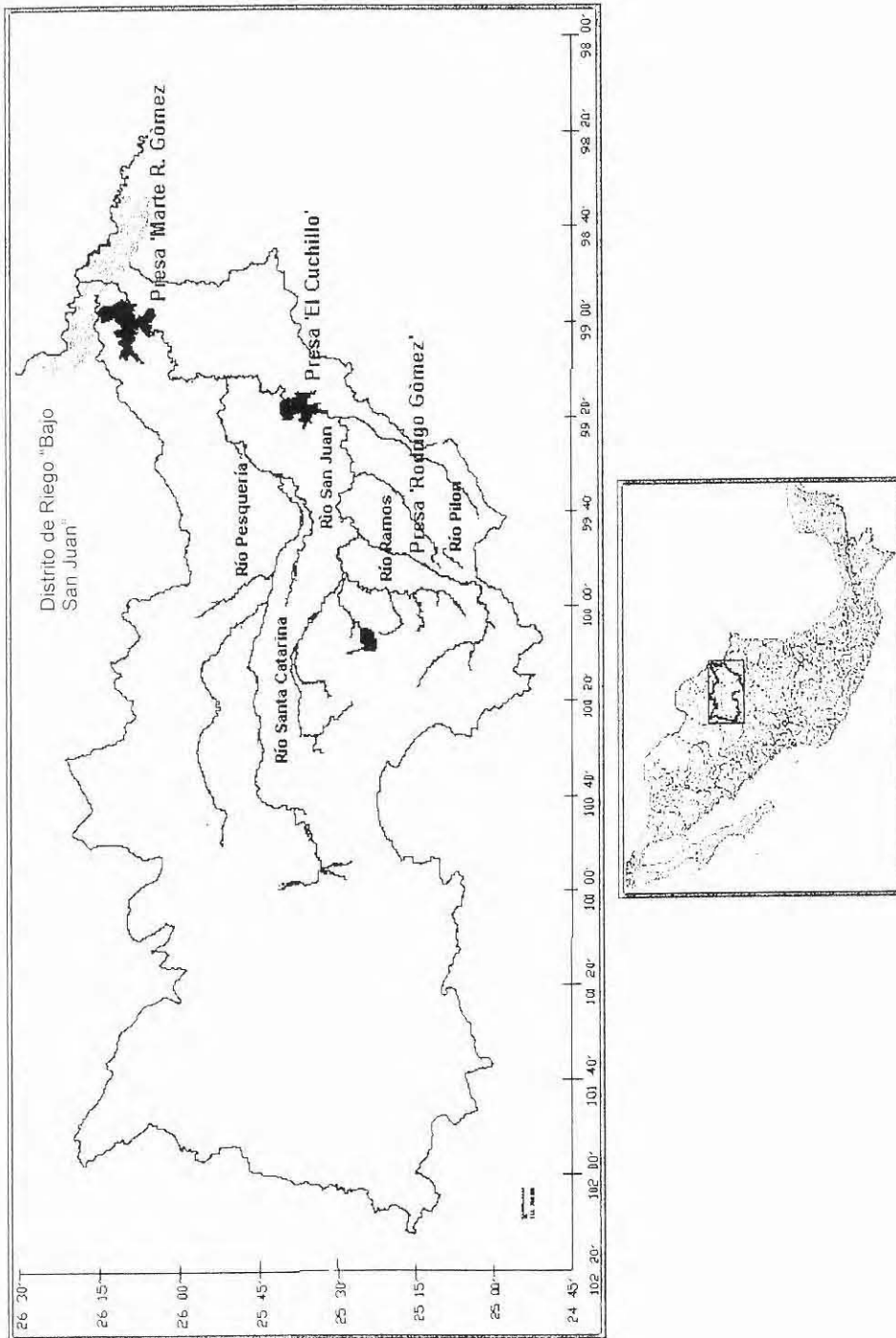


Figura 1. La cuenca del río San Juan en el nordeste de México.

corre en dirección sudeste hasta llegar a la presa Rodrigo Gómez (La Boca) y, de aquí, continúa con el nombre de San Juan (INEGI, 1986) hasta su desembocadura en el río Bravo en Camargo, Tamaulipas. El drenaje superficial está compuesto por los ríos Salinas, Pesquería, Santa Catarina, San Juan, Ramos y Pilón. Los ríos nacen en la región sudoccidental de la cuenca, en la Sierra Madre Oriental, y drenan en una dirección este hacia el río Bravo. Las cuencas vecinas son: río Bravo hacia el noreste, el río Alamo hacia el norte, el río San Fernando hacia el sudoeste y el río Salado hacia el noroeste.

La cuenca se encuentra dentro de las tres provincias fisiográficas del estado de Nuevo León; la Gran Llanura de Norteamérica, la Llanura Costera del Golfo Norte y la Sierra Madre Oriental. La parte de la Sierra Madre Oriental se considera como el parteaguas principal y se localiza en su vertiente sudoccidental y sudoriental, mientras que en la parte nororiental y noroccidental su parteaguas está definido por lomeríos de baja altura (INEGI, 1978).

La cuenca del río San Juan posee una variedad de climas, pero, en general, dominan los áridos a semiáridos; en las vertientes orientales de la Sierra Madre Oriental dominan los climas templado húmedos (INEGI, 1995). La precipitación promedio anual alcanza los 520 mm, de acuerdo con el método aritmético, 505 mm con el método de Thiessen y 495 mm con el método de las isoyetas. La temperatura promedio anual registra 21°C, aunque partes de la Sierra presentan 16°C. En general, la sierra se considera como la zona de recarga de acuíferos de la cuenca por sus altas infiltraciones, caracterizadas por el material geológico, y por los balances hidrológicos, los cuales son los más positivos del estado de Nuevo León (Nívar *et al.*, 1994).

Con respecto a los suelos que predominan en la cuenca cabe distinguir: a) Litosoles en las mesetas de la parte central y occidental

de la cuenca, b) Yermosoles en la región occidental de la cuenca y c) Xerosoles en la parte árida del sistema hidrológico. De acuerdo con los mapas de INEGI de 1978, los usos primarios del suelo son: i) bosques nativos bajos, espinosos en sus diferentes variedades que ocupan un 65% del área total; ii) bosques de coníferas y deciduos, que abarcan un 6.4% del correspondiente, en su mayor parte a la Sierra Madre Oriental, iii) la agricultura cubre el 18% de la superficie de la cuenca y iv) otros usos, que incluyen áreas urbanas, pastizales inducidos, bosques secundarios y cuerpos de agua (Aranda *et al.*, 1998).

Estimación de la superficie agrícola irrigada

Para la estimación de la superficie agrícola irrigada de la cuenca del río San Juan se elaboró un mapa con los diferentes cultivos agrícolas, mediante la digitalización de las cartas de vegetación y uso del suelo elaboradas por la Comisión de Estudios del Territorio Nacional en 1978, escala 1: 50 000. La digitalización se efectuó utilizando el programa de cómputo Autocad 14 para Windows. Para la digitalización del perímetro de la cuenca se utilizaron cartas de hidrología superficial escala 1: 250 000 editadas en 1978 por INEGI. Con el programa de cómputo Autocad LT para Windows se procesó la información digitalizada para determinar las áreas de los diferentes tipos de cultivos que conforman la superficie agrícola irrigada de la cuenca.

Estimación del uso consuntivo

El caudal de agua requerido para el riego de los tres cultivos más populares de la cuenca del río San Juan, maíz, sorgo y cítricos, se estimó a través del uso consuntivo anual de estos mismos cultivos. Este procedimiento no considera el tipo de suelo, porque no se cuenta con información sobre los almacenamientos de agua a través de la porosidad y su capacidad de retención. El método de Blaney y Criddle, descrito por Withers y Vipond (1986) fue

empleado para la estimación de los usos consuntivos. La relación matemática de este procedimiento se describe en el siguiente modelo:

$$U = KF = \sum kf$$

en la que:

U = uso consuntivo de agua por la cosecha,
 K = coeficiente de "uso consuntivo",
 f = suma de los factores mensuales de uso consuntivo:

$$F = (\sum t^* p),$$

t = temperaturas medias mensuales
 p = horas de insolación mensuales

Los datos hidroclimáticos utilizados en la estimación de los usos consuntivos fueron:

- Temperatura media mensual (Fuente: CNA, 1998).
- La cantidad de horas de insolación mensuales se tomó de las tablas de Withers y Vipond (1986), para un promedio de la cuenca de 26° latitud norte.

Los usos consuntivos se calcularon mensualmente para dos etapas de crecimiento de maíz y sorgo. Para el maíz, el primer período fue determinado desde marzo hasta junio y el segundo desde agosto hasta noviembre. Para el sorgo, el primer período de crecimiento se determinó de febrero a junio y el segundo de julio a noviembre. Para los cítricos, sólo se eliminaron los meses de septiembre y enero.

Estimación de las precipitaciones con tres probabilidades de ocurrencia

Para la estimación de las lluvias con las probabilidades de ocurrencia de 20, 50 y 80% se utilizaron distribuciones probabilísticas. La probabilidad de ocurrencia de una lluvia se define matemáticamente como sigue $P_x(x) = px \leq X$. Es decir, es la probabilidad de que ocurra la variable X con una cantidad

igual o menor que x . Por el contrario, la probabilidad de excedencia se estima como $P_x(x) = 1 - (px \leq X)$. Es decir, es la probabilidad de que se exceda la variable X en una cantidad x . Las distribuciones que se probaron fueron la Exponencial, Log normal, Gamma por momentos, Galton, Valores extremos, Gamma por máxima verosimilitud 1 y Gamma por máxima verosimilitud 2.

- La distribución exponencial. La familia de distribuciones exponenciales proporciona modelos de probabilidad que son ampliamente utilizados en la ingeniería y las ciencias. Se dice que X tiene una distribución exponencial si la p.d.f. de x es:

$$f(x, \lambda) = \lambda e^{-\lambda x}$$

donde $\lambda = 1/xp$, xp = promedio aritmético de x , e = la función inversa del logaritmo natural. La p.d.f. exponencial es un caso especial de la expresión de la p.d.f. gamma general, en la que $\alpha = 1$ y β ha sido sustituida por $1/\lambda$. La forma integral de esta distribución se da en la siguiente ecuación:

$$P(x) = \int_0^x \lambda e^{-\lambda x} = 1 - e^{-\lambda x}$$

- La distribución lognormal. Una variable aleatoria no negativa (x) se dice que tiene una distribución lognormal si la variable $Y = \ln(x)$ tiene una distribución normal. La p.d.f. resultante de la variable lognormal en la que $\ln(x)$ es normalmente distribuida con parámetros μ y σ es:

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} [\ln(x) - \mu]^2}$$

μ y σ no son la media y la desviación estándar de $\ln(x)$. Las tablas de la distribución normal se utilizan para estimar las probabilidades o las lluvias con las probabilidades de interés, con la transformación

logarítmica de las lluvias mensuales.

- La distribución de Galton. La distribución de Galton se aplica comúnmente a datos asimétricos, usando un parámetro z que se calcula de la siguiente manera:

$$z = \frac{\log(x/g)}{\log(Gg)}$$

donde: x = datos originales, g = media geométrica, Gg = desviación geométrica. Posteriormente se estima la probabilidad de z o el valor de z con la probabilidad estimada para conocer la precipitación con la probabilidad deseada.

- La distribución de valores extremos o Gumbel-Fisher-Tippet. La función de densidad de probabilidad para la distribución de valores extremos del Tipo I es:
- $p_x(x) = e^{-\{(x-\beta)/\alpha\}} \cdot e^{-\{(x-\beta)/\alpha\}} / \alpha$

donde: e = la función inversa del logaritmo natural, x = la variable aleatoria (precipitación mensual), α y β son parámetros de forma y escala de la distribución de precipitaciones mensuales.

- La distribución Gamma. La función gamma se ajustó por medio del método de momentos, máxima verosimilitud 1 (procedimiento de Thom) y máxima verosimilitud 2 (procedimiento de Greenwood y Durand). La función de densidad gamma está dada por:

$$p_x(x) = \lambda^\eta x^{\eta-1} e^{-\lambda x} / \Gamma(\eta) \quad X, \lambda, \eta > 0$$

$\Gamma(\eta)$ = es la función gamma, la cual tiene las siguientes propiedades:

$$\begin{aligned} \Gamma(\eta) &= (\eta-1)! \quad \text{para } \eta = 0, 2, 2, 3, \dots \\ \Gamma(\eta+1) &= \eta \Gamma(\eta) \quad \text{para } \eta > 0 \\ \Gamma(1) &= \int_0^\infty t^{\eta-1} e^{-t} dt \quad \text{para } \eta > 0 \end{aligned}$$

Solución por el método de momentos:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \sum x_i / n \\ s &= \sqrt{\left(\sum x_i^2 \right) - n \bar{x}^2 / (n-1)} \\ \hat{\lambda} &= \bar{x} / s^2 \end{aligned}$$

Solución por el método de máxima verosimilitud 1:

$$\begin{aligned} \ln(\bar{x}) &= \sum_{i=1}^n \ln x_i / n \\ y &= \ln \bar{x} - \ln \bar{x} \\ \hat{\eta} &= (1 + \sqrt{1 + 1.33 y}) / 4 y \\ \hat{\lambda} &= \hat{\eta} / \bar{x} \end{aligned}$$

Solución por el método de máxima verosimilitud:

$$\begin{aligned} y &= \ln \bar{x} - n \bar{x} \\ \hat{\eta} &= (0.5000876 + 0.1648852 y - 0.0544274 y^2) / y \\ \hat{\lambda} &= \hat{\eta} / \bar{x} \end{aligned}$$

donde: \ln = logaritmo natural, x = es la variable aleatoria o precipitación mensual, λ y η = parámetros de forma y escala de la distribución de precipitaciones mensuales.

El ajuste de las distribuciones se realizó con las precipitaciones mensuales estimadas y observadas de cada una de las 54 estaciones climáticas de la cuenca. Para esto se aplicaron las pruebas de χ^2 y Kolmogorov-Smirnoff para definir la distribución de mejor ajuste y estimar las precipitaciones con las probabilidades definidas previamente.

Estimación de la cantidad de agua necesaria para irrigar la superficie agrícola de la cuenca del río San Juan

Los valores de precipitación, estimados por la distribución de mejor ajuste, para cada una de las tres probabilidades (20, 50 y 80% de probabilidad de ocurrencia) se restaron del uso consuntivo, estimado para cada estación climática para cada mes de crecimiento para cada cultivo. Este valor se promedió entre estaciones climáticas vecinas a cada unidad de riego previamente definidas. El promedio se multiplicó por el área de la unidad de riego para estimar el caudal de agua necesario para satisfacer el uso consuntivo. Este procedimiento supone que la lluvia mensual se presenta en forma torrencial, característica de climas semiáridos, y que, por consiguiente, se requiere de riego continuamente. Esta suposición es parcial por las altas evaporaciones que se presentan y reducen los contenidos de agua de los suelos significativamente en poco tiempo.

Datos utilizados para los usos consuntivos y precipitaciones

Los datos utilizados correspondieron a precipitaciones y temperaturas mensuales, para estimar las lluvias y sus probabilidades de ocurrencia, y los usos consuntivos. Los datos mensuales retienen las tendencias estacionales de los datos climáticos y a la vez proveen una fuente de datos adecuada para la estimación de parámetros de distribuciones (Ward, 2000). Una vez calculados los usos consuntivos mensuales, se estimaron los usos consuntivos totales por año, por cultivo y por unidad de riego.

RESULTADOS

La superficie agrícola irrigada de la cuenca del río San Juan

Se estimó una superficie total de 172 298.74 ha de agricultura de riego a en la cuenca del

río San Juan, la cual incluye 76 205 ha, correspondientes a la superficie del distrito de riego 026 o 'Bajo San Juan'. La superficie ocupa principalmente los distritos 026, Las Lajas y Montemorelos-General Terán (Figura 2). Los tipos de cultivos más comunes que conforman la superficie agrícola irrigada de la cuenca son: maíz, sorgo y cítricos principalmente. En algunas áreas los cultivos suelen encontrarse asociados con otros tipos de cultivos, pero predominan los tres mencionados anteriormente. En total, el sorgo cubre una superficie de 76 527 ha, el maíz 74 169 ha, cítricos 15 010.89 ha y otros cultivos con 6 592 ha; las superficies porcentuales respectivas son 44, 43, 9 y 4%.

Usos consuntivos estimados para las superficies agrícolas irrigadas de la cuenca del río San Juan

Los resultados de la estimación de los usos consuntivos de los dos ciclos de crecimiento para los cultivos maíz, sorgo y cítricos estimados en 54 estaciones climatológicas ubicadas dentro de la cuenca del río San Juan indicaron que como promedio se utilizan 983.5 mm para regar los tres cultivos. Esta cantidad sobrepasa las precipitaciones promedio estimadas para cualquiera de las probabilidades seleccionadas.

Para el maíz, el uso consuntivo promedio y su desviación estándar oscilaron en 990.7 mm y 46.36 mm, respectivamente. Para el sorgo, el uso consuntivo promedio y su desviación estándar oscilan entre los 1 131 mm y 82 mm, respectivamente. Para los cítricos, el uso consuntivo promedio y su desviación estándar fueron 829 mm y 38 mm, respectivamente. Las unidades de riego Montemorelos y La Ciénega presentaron los usos consuntivos máximos (847 mm) y mínimos (760 mm), respectivamente. Las unidades de riego cerca de la Sierra Madre Oriental, donde se siembran preferencialmente cítricos, presentaron usos consuntivos menores que el resto de las unidades de riego.

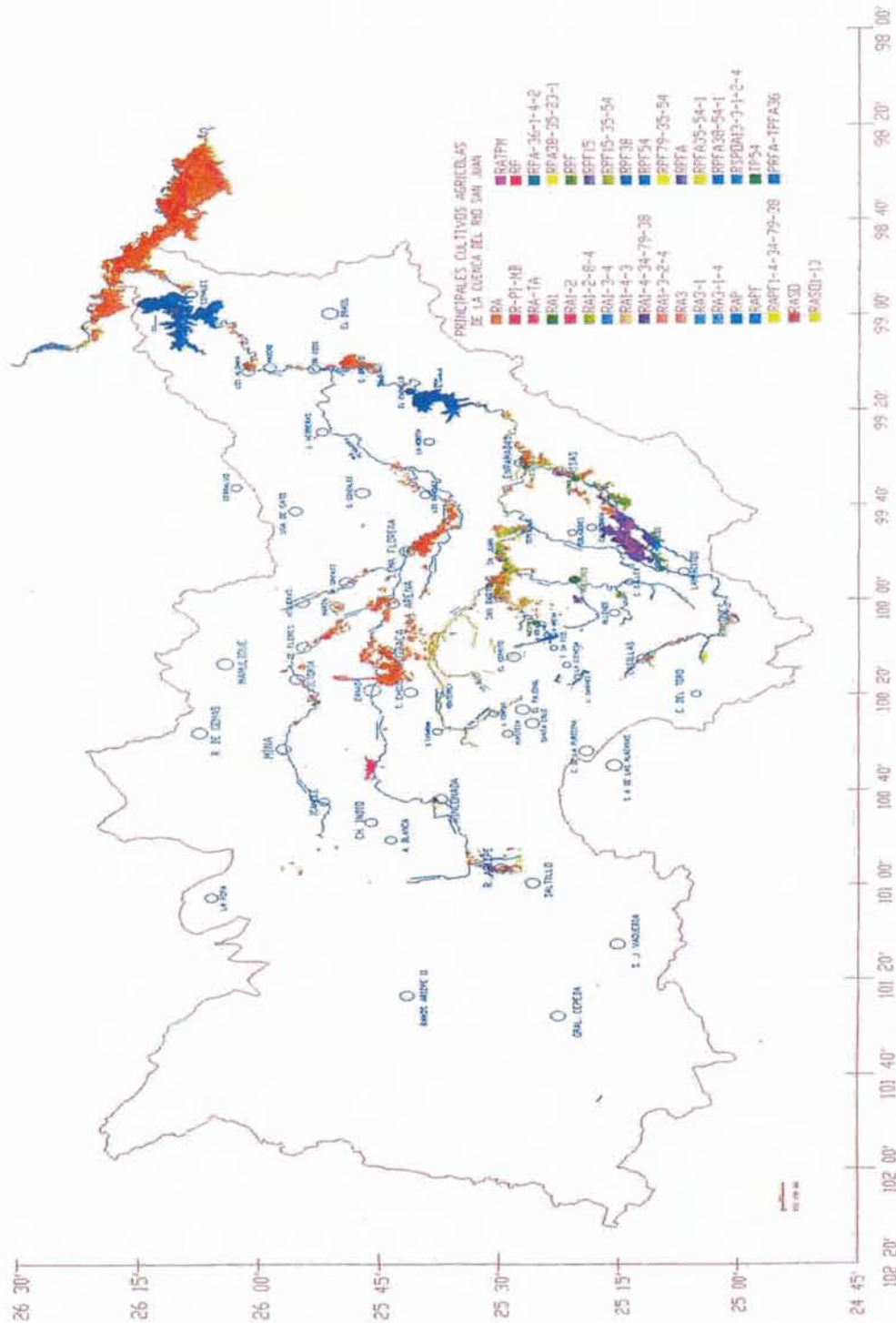


Figura 2. Superficies bajo irrigación en la cuenca del río San Juan, digitizadas de mapas de vegetación de INEGI, 1978.

Las temperaturas promedio más bajas en esta parte de la cuenca determinan las diferencias en los usos consuntivos.

Las precipitaciones con tres probabilidades de ocurrencia

De las ocho distribuciones probadas, la exponencial y la gamma, que cuentan con estimación de parámetros por máxima verosimilitud 1 y máxima verosimilitud 2, presentaron el mejor ajuste, con un 60.5%, 63.3% y 62.5% de aceptación de H_0 , respectivamente. Las otras distribuciones presentaron un porcentaje de H_0 's bajo, menores que 40%. Por su facilidad para estimar parámetros, su rapidez y flexibilidad, la distribución gamma con procedimiento de estimación de parámetros de máxima verosimilitud 1 se utilizó para realizar las predicciones de la precipitación mensual con tres probabilidades: 20, 50 y 80% de ocurrencia. Las precipitaciones estimadas con estas probabilidades no son críticas, porque no se encuentran en los extremos de las precipitaciones, donde las probabilidades son muy bajas, y los errores en la estimación crecen.

Las precipitaciones estimadas mediante la distribución gamma para las tres probabilidades (50, 20 y 80% de ocurrencia) en todos los meses de crecimiento de los cultivos presentaron promedios y desviaciones estándares de: 271 y 100 mm; 86 y 96 mm y 834 y 232 mm. El sorgo, durante todos los meses de crecimiento en el año, registró precipitaciones promedio y desviaciones estándar de: 240 y 122 mm; 75 y 47 mm y 924 y 270 mm. Para los cítricos, en todos los meses de crecimiento las precipitaciones promedio y sus desviaciones estándar fueron de: 233 y 66 mm; 44 y 26 mm y 813 y 213 mm. En promedio, las precipitaciones estimadas para el sorgo son mayores que aquellas estimadas para maíz y cítricos. Esto se debe a que el sorgo se cultivaba en 1978 en zonas climáticas con las mayores precipitaciones y a que los tiempos de cultivo son mayores.

La precipitación promedio, con un 50% de probabilidad de ocurrencia estimada para la época de crecimiento de los dos ciclos, en el maíz alcanzó 270 mm, en el sorgo, 239 mm y para los cítricos fue de 233 mm. Estas precipitaciones son bajas, en contraste con las evaporaciones registradas en los evaporímetros de la cuenca y con las necesidades de riego estimadas a través de los usos consuntivos.

La precipitación promedio con un 20% de probabilidad de ocurrencia estimada para la época de crecimiento para el maíz fue de 86 mm, para sorgo fue de 75 mm y para cítricos, de 44 mm. Estas precipitaciones disminuyen, en contraste con aquellas estimadas para el 50% de probabilidad de ocurrencia, sin embargo, se presentan exclusivamente en cuatro de cada cinco años. Estas estimaciones son aproximadamente 1/20 las evaporaciones registradas en los evaporímetros de la cuenca.

La precipitación promedio con un 80% de probabilidad de ocurrencia estimada por la distribución gamma para la época de crecimiento, para el maíz fue de 834 mm; para el sorgo registró 924 y los cítricos, 813 mm. Estas precipitaciones se incrementan en contraste con aquellas estimadas para el 50 y el 80% de probabilidad de ocurrencia; sin embargo, éstas se presentan también exclusivamente en uno de cada cinco años. Estas estimaciones son aún entre 1/2 y 1/3 de las evaporaciones registradas en los evaporímetros de la cuenca.

Volúmenes de agua de irrigación

Con precipitaciones promedio, con un 50% de probabilidad de ocurrencia, la cantidad de agua necesaria para irrigar maíz asciende a 524 mm³, para sorgo a 682 mm³ y para cítricos a 112 mm³, con un total de 1 319 mm³ año⁻¹ (Cuadro 1). El déficit total de agua de irrigación es mayor que el caudal de descarga promedio registrado en el río San Juan en la estación Los Aldamas, el cual se presenta como promedio en 1 160 mm³ año⁻¹ (Návar, 1999).

Cuadro 1. Los volúmenes de agua estimados para satisfacer los requerimientos de irrigación en la superficie agrícola irrigada en la cuenca del río San Juan, con tres probabilidades de ocurrencia de la lluvia durante el crecimiento de tres tipos de cultivo

Unidad de Riego	80% de probabilidad			50% de probabilidad			20% de probabilidad		
	Maíz	Sorgo	Cítricos	Maíz	Sorgo	Cítricos	Maíz	Sorgo	Cítricos
Agua Blanca	4.4	*	*	6.5	*	*	7.5	*	*
Ch. Indio	5.4	*	*	8.1	*	*	9.3	*	*
R. Arizpe	6.0	*	0.3	22.5	*	1.6	26.1	*	1.9
Rinconada	3.7	*	0.2	14.0	*	1.0	16.2	*	1.3
Mina	10.4	*	0.2	20.9	*	0.7	24.0	*	0.8
S. Victoria	6.2	*	0.0	19.3	*	0.0	23.7	*	0.0
S. Catarina	0.2	*	*	0.6	*	*	0.7	*	*
Marin	6.7	*	0.0	23.1	*	0.1	30.6	*	0.1
La Arena	5.4	*	0.0	28.3	*	0.0	37.4	*	0.0
Dr. González	0.4	*	*	2.1	*	*	2.7	*	*
Apodaca	16.9	*	0.0	88.6	*	0.8	113.7	*	1.0
Santa Ma La Floreña	22.6	1.6	0.0	80.8	6.5	0.2	105.3	6.7	0.3
Tepehuaje	0.0	0.0	0.0	53.5	4.7	15.7	0.0	6.8	25.0
La Ciénega	0.1	*	0.0	0.6	*	1.0	0.8	*	1.4
Los Herreras	12.2	1.2	*	60.1	7.5	*	75.1	9.4	*
Los Aldamas	4.6	*	*	22.2	*	*	27.3	*	*
Las Enramadas	0.0	*	0.0	46.2	*	1.2	63.0	*	1.6
Casillas	6.9	*	0.1	24.2	*	0.5	30.5	*	0.7
Montemorelos	0.0	*	0.0	2.8	*	60.9	0.0	*	97.7
Distrito 026	*	72.4	*	*	570.3	*	*	850.4	*
Promedio	5.9	18.8	0.1	27.6	147.2	6.4	31.0	218.3	10.1
Desviación estándar	6.1	35.7	0.1	26.4	282.1	16.9	34.0	421.4	27.1
Total en la cuenca	112.3	75.2	0.9	524.1	589.0	84.0	594.0	873.0	132.0

* No existe cultivo medible en superficie.

Los déficits totales de agua para complementar los requerimientos de irrigación de los cultivos para el maíz, con lluvias predichas con un 20% de probabilidad de ocurrencia, ascienden para el maíz a 682 mm³, para sorgo a 873 mm³ y para cítricos a 132 mm³, con un total de 1 688 mm³ año⁻¹ (Cuadro 1). El déficit total de agua para irrigación se incrementa en un 36% en con-traste con el caudal de descarga promedio registrado en el río San Juan en la estación Los Aldamas y hasta 41% en contraste con el agua requerida cuando se presentan lluvias con un 50% de probabilidad de ocurrencia.

Los volúmenes totales de agua que complementarán los requerimientos de irrigación de los cultivos de maíz, con lluvias predichas con un 80% de probabilidad de ocurrencia, ascienden para el maíz a 112 mm³, para el sorgo a 75 mm³ y para los cítricos a 0.86 mm³, con un total de 188 mm³ año⁻¹ (Cuadro 1). La cantidad de agua para irrigación se reduce en 85% con respecto al caudal de agua promedio medido en Los Aldamas, Nuevo León. Esta cantidad se reduce también en 84 y en 89% en contraste con los volúmenes estimados con lluvias con probabilidades de ocurrencia del 50 y 80%, respectivamente.

En ocasiones, en las unidades de riego de la cuenca cambian los cultivos por razones de falta de agua, justificaciones económicas, etc. Por esta razón, se estimaron los volúmenes de agua bajo el escenario de qué pasaría si todos los cultivos anuales fueran de un solo tipo; maíz o sorgo. Para el caso de maíz, incluyendo los cítricos, el volumen de agua para toda la cuenca sería de $1\,069\text{ mm}^3\text{ año}^{-1}$, $1\,560\text{ mm}^3\text{ año}^{-1}$, y $114\text{ mm}^3\text{ año}^{-1}$ para precipitaciones presentadas con el 50, 20 y 80% de ocurrencia, respectivamente. Para el caso de plantar exclusivamente sorgo, incluyendo los cítricos en sus áreas correspondientes, el caudal se incrementa hasta $1\,326\text{ mm}^3\text{ año}^{-1}$, $1\,793\text{ mm}^3\text{ año}^{-1}$ y $207\text{ mm}^3\text{ año}^{-1}$ para precipitaciones estimadas con el 50, 20 y 80% de ocurrencia, respectivamente. Los caudales incrementan en $257\text{ mm}^3\text{ año}^{-1}$, $233\text{ mm}^3\text{ año}^{-1}$ y $93\text{ mm}^3\text{ año}^{-1}$ para las precipitaciones presentadas con probabilidades de ocurrencia de 50, 20 y 80%, respectivamente, en contraste con el área cultivada con maíz y cítricos. Estos volúmenes incrementaron en 22, 20 y 8% en contraste con los volúmenes estimados para condiciones de los tres cultivos comunes en la cuenca del río San Juan.

DISCUSIÓN

En este trabajo se ha afirmado que existen $172\,000\text{ ha}$ de superficie irrigada en la cuenca del río San Juan. De esta superficie, el 43% corresponde a maíz, el 34% a sorgo, el 9% a cítricos y la restante, a otros cultivos. La mayoría de las parcelas con riego se identificaron cerca de los principales ríos de la cuenca (Figura 2), lo que permite mostrar la validez de la suposición de que éstas extraen el agua del sistema hídrico para complementar los usos consuntivos de los cultivos.

Los caudales totales necesarios para irrigar toda esta superficie se aproximan a $1\,319\text{ mm}^3\text{ año}^{-1}$, cuando las precipitaciones

que se presentan tienen un 50% de probabilidad de ocurrencia. Este caudal se compara con el gasto promedio del río San Juan medido en la estación Los Aldamas. En épocas de sequía, cuando se presentan precipitaciones mensuales por debajo del promedio, con un 20% de probabilidad de ocurrencia, se requieren $1\,688\text{ mm}^3\text{ año}^{-1}$ para irrigar toda la superficie agrícola. Las sequías tienden a disminuir aún más el gasto del río San Juan, al aumentar el caudal extraído en un 28% con respecto al gasto obtenido durante la presencia de condiciones hidrológicas normales. Como consecuencia, el gasto de los ríos se ve disminuido y, en ocasiones, no corre agua por efectos de las sobre extracciones y por la presencia de sequías. De esta manera, y parcialmente por esta práctica, se reducen los almacenamientos de las presas (Marte R. Gómez y El Cuchillo). Es decir, en tiempos de sequías la agricultura extrae el agua remanente de los ríos y ésta no alcanza a satisfacer toda la superficie irrigada.

El nordeste de México está expuesto a sequías de diferentes magnitudes tanto en tiempo como en espacio. Reportes de organizaciones internacionales (UNESCO, 1999; IPCC, 2001) han señalado que la disponibilidad de agua para satisfacer las necesidades humanas será más variable en el futuro, sobre todo en países susceptibles a las sequías recurrentes y severas, y con crecimientos poblacionales importantes. México, por su posición geográfica, se encuentra dentro de las latitudes de los grandes desiertos y el norte se ha caracterizado por estas variaciones climáticas desde que se tiene registro del hidroclima. Estas variaciones repercuten en la superficies agrícolas irrigadas. En el distrito de riego Bajo San Juan las superficies agrícolas se han reducido hasta un 20% en la década de los años noventa (Figura 3; Návar, 2000) y en el Bajo río Bravo las superficies irrigadas también han estado disminuyendo notoriamente (Navar, 2000; Schmandt *et al.*, 2000), de tal manera

que, para el ciclo 2001-2002, se tiene programado no sembrar superficies irrigadas (*El Norte*, 22/01/2001).

Simulaciones sobre escenarios futuros de la superficie irrigada del 026 o Bajo San Juan y del 025 o Bajo río Bravo con presencia de sequías históricas y crecimiento en el uso del agua por la población demostraron una consistente reducción de la superficie agrícola, con oscilaciones de hasta en un 65% para el año 2045 (Nívar, 1999, 2000, 2001) y es posible que esta tendencia sea similar para toda la superficie bajo riego de la cuenca.

Para condiciones húmedas, cuando se presentan precipitaciones con un 80% de ocurrencia, se extrae muy poco caudal de los ríos ($188 \text{ mm}^3 \text{ año}^{-1}$). Es decir, ante la presencia de lluvias importantes, poca cantidad

de agua se extrae de los ríos para satisfacer el uso consuntivo de los cultivos y, como consecuencia, no se modifican los gastos sustancialmente.

El caudal de irrigación promedio estimado en este reporte ($1\,319 \text{ mm}^3 \text{ año}^{-1}$) hace del sector agrícola el principal usuario del agua de la cuenca. El caudal utilizado por el sector municipal se aproxima a los $415 \text{ mm}^3 \text{ año}^{-1}$ y es actualmente tres veces menor que el caudal utilizado por la agricultura. Sin embargo, para el año 2050, la demanda municipal por el agua incrementará hasta $890 \text{ mm}^3 \text{ año}^{-1}$ y la proporción entre uso agrícola/uso municipal se reducirá hasta un factor de 1.5 para condiciones de hidrología normal. Es posible que las presiones ambientales para la conservación de los humedales jueguen también un papel importante dentro de la distribución del agua de los ríos.

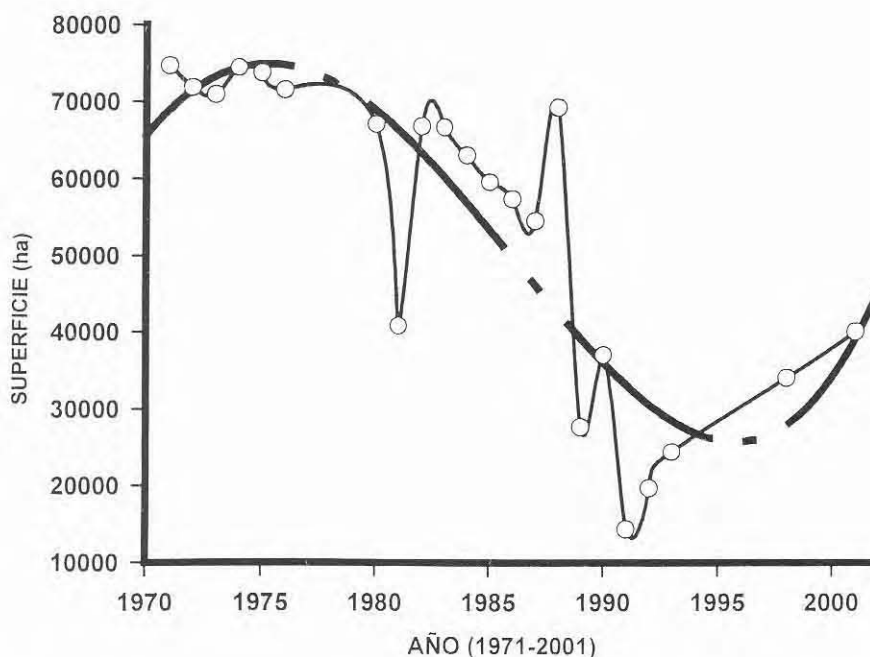


Figura 3. Las superficies irrigadas históricamente y su tendencia en el distrito de riego Bajo San Juan.

La dependencia de la agricultura del riego hace que su superficie sea sensible a las variaciones del gasto del río San Juan. La población humana continuará creciendo (CONAPO, 1996) y demandando agua de la cuenca, con la consiguiente repercusión en la agricultura de riego. Las tendencias a reducir las áreas agrícolas con riego están presentándose en muchas partes del mundo semiárido; norte de África, noroeste de la India, medio Este y China (Gong y Lin, 2000; Postel, 2000). Por esta razón es indispensable trabajar los conceptos del manejo sustentable de los recursos hidrológicos propuesto en la cumbre de Río de Janeiro sobre Población y Medio Ambiente (UNCED, 1992) a fin de tratar de satisfacer las necesidades de agua de la población humana, la agricultura y la conservación de los ecosistemas acuáticos.

El manejo sustentable de los recursos hidrológicos superficiales de la cuenca del río San Juan es un compromiso multi-sectorial. Existe evidencia de pérdidas de agua en los sistemas de distribución de la misma en muchas ciudades. La eficiencia de transporte, conducción y distribución en el sector municipal va desde un 30 hasta un 60% (CNA, 2000). Reduciendo parcialmente estas pérdidas en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM) se podría irrigar una superficie adicional de 18 000 hasta 55 000 ha. El uso *per capita* municipal, el cual ahora asciende a 290 litros día⁻¹ habitante⁻¹ (Návar, 1999), y es consistente con el promedio general para los Estados Unidos de Norteamérica (Soley *et al.*, 1998). La tasa podría reducirse a niveles de uso conscientes de la sequía y del ecosistema semiárido que enmarca la cuenca, recordando que algunas ciudades como Amman y Lalitpur tienen una tasa *per capita* de 40 litros día⁻¹ habitante⁻¹ (Schmitt, 1997).

El volumen de agua promedio mundial necesario para producir una tonelada de grano se aproxima a 1 000 m³ (Doorembos y Kassam, 1979). En el distrito de riego 026 esta eficien-

cia es baja, 2 800 m³: 1mg de grano (Návar y Flores-Laureano, 2002). Esto se refleja en pérdidas de agua notorias, con una eficiencia de aplicación absoluta total del 35% (SARH, 1981) e incluye pérdidas por transporte, conducción, aplicación y uso del agua por los cultivos. Las pérdidas por percolación profunda son altas y éstas van desde un 10 a un 20% (SARH, 1981). El riego por rodado es el principal sistema de aplicación del agua a las parcelas y su eficiencia es de un 30-90%, dependiendo del tipo de cultivo (Schwab *et al.*, 1980). El incremento en la eficiencia en el transporte, aplicación y uso por los cultivos hasta un posible 60%, con canales ademados y tecnologías de riego más eficientes, repercutiría en un incremento de la superficie irrigada de una superficie de 24 000 ha en la cuenca del río San Juan. La reducción en las láminas de aplicación en un 50% podría conservar agua para irrigar otra superficie igual. En esta área se requieren mediciones continuas del balance de humedad de los suelos para determinar las cantidades y tiempos apropiados de riego. La forma en que se realiza esta práctica convencionalmente, con riegos fijos, es demasiado costosa.

Además de la escasez de agua en tiempos de sequía, el uso del agua de los ríos se ve mermado por su contaminación. A pesar de la puesta en marcha del plan Monterrey IV, la contaminación del agua del río San Juan aún sobrepasa el 18% de las normas de calidad del agua para varios usos (Flores y Navar, 2002). Por esta razón, existe la necesidad de continuar tratando las aguas municipales, reducir la entrada de contaminantes y conservar los humedales para tratar naturalmente las aguas remanentes de los ríos. De continuar la tendencia observada en la contaminación, se continuará reduciendo la disponibilidad del agua por conceptos de contaminación. El manejo de embalses es también prioritario, es importante tratar al complejo El Cuchillo-Martín R. Gómez con programas de optimización de

manejo de los almacenamientos y transferencia de agua en los momentos más oportunos. La operatividad de estas prácticas es urgente y requiere de la atención de la sociedad en general (UNCED, 1992), ya Postel (2000) enfatizó la necesidad de doblar la productividad del agua en todos los sistemas. Es decir, obtener el doble de servicios: satisfacción y beneficio por cada unidad de agua extraída de los ríos y acuíferos. Schmandt *et al.* (1998; 2000) señalaron la necesidad de informar a la sociedad sobre la problemática del agua para poder encontrar mecanismos y estrategias para su manejo sustentable.

CONCLUSIONES

En este trabajo se encontró que la superficie agrícola bajo riego está demandando un poco más de tres veces más agua que el sector municipal de la cuenca del río San Juan. Considerando las anomalías climáticas, aunadas al crecimiento de la población, se preve, como está sucediendo, que la superficie agrícola se comprimirá, repercutiendo en el sector agrícola. Por esta razón se propone la necesidad de implementar el manejo sustentable de los recursos hidrológicos de la cuenca del río San Juan, como una alternativa viable para amortiguar los impactos negativos de estos cambios.

RECONOCIMIENTOS

Para la realización de este estudio se contó con los apoyos financieros de los proyectos de investigación 6033 y CTO99 CN 323 00 patrocinados por El Sireyes, Sistema de Investigación Alfonso Reyes, y Paicyt, Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica, de la UANL, respectivamente.

REFERENCIAS

- Aranda, R., R. Zamarripa, L. Rojas, G. Navarro y J. Nívar (1998), "Ordenamiento hidrológico de la cuenca del río San Juan", *9th US/Mexico Border States Conference on Recreation, Parks, and Wildlife*, June 3-6, USDA for Ser RMRS-P-5. Tucson, Arizona.
- CNA (Comisión Nacional del Agua; 1997), *Datos climáticos de los municipios fronterizos*, Gerencia estatal Tamaulipas, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México.
- CNA (Comisión Nacional del Agua; 1998), *Datos hidrométricos de los embalses y climáticos de la cuenca del río San Juan*, Gerencia estatal Nuevo León, Monterrey, Nuevo León, México.
- CNA (Comisión Nacional del Agua; 2000), *Proyecciones de pérdidas de agua en los sistemas de drenaje de las ciudades de México*, comunicación personal.
- CONAPO (Consejo Nacional de Población; 1996), *Estimaciones y proyecciones de la población*, Consejo Nacional de Población, México.
- Contreras, B. S. y V. M. L. Lozano (1994), "Water, endangered fishes, and development perspectives in arid lands of Mexico", *Conservation Biology* 8, pp. 379-387.
- Doorenbos, J. y A. H. Kassam (1979), *Yield responses to water. Food and Agriculture*, Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- El Norte* (22/01/2001) "Señalan inequidad en reparto de agua", reporte escrito por Miguel Domínguez, Monterrey, N. L., México.
- ERL (Environmental Resources Limited; 1991), *Plan de manejo de los embalses de la cuenca del río San Juan*, CEE. Madrid, España.
- Flores Laureano, J. S. y J. Nívar (2001), "An assessment of streamflow pollution within the rio San Juan, Nuevo León, Mexico", *Press in Journal of Environmental Quality*.
- Guerra, P. S. y J. Nívar (1999), "Caracterización del ecosistema ripario en la cuenca del río San Juan", *IV Congreso de Recursos Forestales*, Sociedad Mexicana de Recursos Forestales, Durango, México.
- Guerra, P. S. (2000), *Evaluación de la vegetación riparia, insectos acuáticos y peces, influenciados por las variaciones en la calidad y cantidad de los caudales de la cuenca del río*

San Juan, Nuevo León, México.

☞ Gong, J. y Lin H. (2000), "Sustainable Development for Agricultural Region in China: case studies", *Forest Ecology and Management* (128), pp. 27-138.

☞ INEGI (1978), Cartas Geológicas "Monclova" G14-4, "Reynosa" G14-5, "Concepción del Oro" G14-10, "Linares" G14-11, escala 1: 250 000, México.

☞ INEGI (1995), *Anuarios estadísticos de Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y Gobiernos de los estados de Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila. Ciudad Victoria, Monterrey y Saltillo, México.

☞ INEGI-SEMARNAP (1999), *Estadísticas del medio ambiente*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca, México.

☞ Návar, J., T. Cavazos y P. A. Domínguez (1994), "Los balances hidrológicos mensuales con tres probabilidades de precipitación en el estado de Nuevo León", en Pola S., C., J. A. Ramírez F., M. M. Rangel e I. Navarro (eds.), *Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra UANL*, Linares, 8, pp. 71-82.

☞ Návar, J. (1999), "Agua y desarrollo sustentable en la cuenca baja del río Bravo-San Juan", *Ciencia UANL*, 2 (4), pp. 356-362.

☞ Návar, J. (2000), "Surface water supply and demand in the Mexican lower Rio Bravo/Rio Grande basin", *HARC-ITESM Joint Research Project on Water and Sustainable Developmen in the Binational Lower Rio Bravo/Rio Grande Basin*, ITEM. Monterrey, N.L., México. EPA Research Grant No. R 824799-01-0.

☞ Návar, J. (2001), "Water supply and demand scenarios in the San Juan watershed", *Geofísica Internacional* 40, pp. 121-134.

☞ Návar, J. y S. J. Flores Laureano (2002), "Water scarcity and degradation of aquatic ecosystems in the Rio San Juan watershed of northeastern Mexico", en revisión en *Ecological Applications*.

☞ Postel, L. S. (2000), "Entering an era of water scarcity: the challenges ahead", *Ecological Applications* 10 (4), pp. 941-948.

☞ SARH (1981), Rehabilitación de los Distritos de riego del Bajo río Bravo (25) y del río San Juan (26), Tamaulipas, Resumen, Infraestructura, Recursos y Servicios, México.

☞ SARH-CNA (1994), *Consejo de cuenca del río Bravo*, CNA, Gerencia Regional Nordeste, México.

☞ Schmandt, J., Stolp C. y G. Ward (1998), *Scarce water: doing more with less in the lower río Grande*, US-Mexican Policy Studies Program, Policy Report no. 8, The University of Texas, Austin, TX.

☞ Schmandt, J., I. Aguilar, N. Armstrong, L. Chapa, S. Contreras, R. Edwards, J. Hazelton, M. Mathis, J. Návar, E. Vogel y G. Ward (2000), "Water and sustainable development", *Executive Summary*, March 31, EPA research Agreement R 824799-01-0.

☞ Schmitt, T. G. (1997), "Water protection human beings a triangular relationship in changing times", *App Goeg & Dev* 49: 59-78.

☞ Schwab, G. O., R. K. Frevert, T. W. Edminster y K. K. Barnes (1981), *Soil conservation engineering*, Third Edition, John Wiley and Sons, New York.

☞ Soley, W. B., R. R. Pierce y H. A. Perlman (1998), "Estimated use of water in the United States in 1995", *U.S. Geological Survey*, Circular No. 1200.

☞ UNCED (1992), *United Nations Conference on Environment and Development*, Agenda 21, Chapter 18, sections 8 and 9, Rio de Janeiro, Brazil.

☞ UNESCO, WMO (1999), Reporte de 1999, Ginebra Suiza, *El Norte* 9 de febrero de 1999, Monterrey, N. L., México.

☞ Ward, G. (2000), "Water and sustainable development", *Executive Summary*, March 31, EPA research Agreement R 824799-01-0.

☞ Withers, B. y S. Vipond (1986), *El riego: diseño y práctica*, 5ª imp., Diana, México.